

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**Глєбова М. Л.,**  
**Форкун Я. Б.**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЙ**  
**з дисципліни**

# **ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ**

## **ЧАСТИНА 3** **МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ** **ТА ВЕНТИЛЬНІ ДВИГУНИ**

*(для студентів усіх форм навчання за спеціальністю*  
*141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

**Харків – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова – 2017**

**Глебова М. Л.** Текст лекцій з дисципліни «Електричні машини» Частина 3 Машини постійного струму та вентильні двигуни (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / М. Л. Глебова, Я. Б. Форкун ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 53 с.

Автори : канд. техн. наук, доц. М. Л. Глебова,  
канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун

Рецензент д-р техн. наук, проф. А. Г. Сосков

Рекомендовано кафедрою теоретичної та загальної електротехніки,  
протокол № 11 від 26. 04. 2017 р.

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
Електромеханічне перетворення енергії, оборотність електричних машин.....	5
1 Машини постійного струму.....	8
1.1 Побудова та принцип дії генератора і двигуна постійного струму.....	8
1.2 Електрорушійна сила обмотки якоря, електромагнітний момент.....	11
1.3 Магнітне поле та реакція якоря машин постійного струму.....	13
1.4 Комутація в машинах постійного струму.....	16
1.5 Рівняння генераторів постійного струму.....	23
1.6 Характеристики генераторів постійного струму незалежного, паралельного, послідовного та змішаного збудження.....	24
1.7 Рівняння двигунів постійного струму.....	29
1.8 Характеристики двигунів постійного струму паралельного, послідовного та змішаного збудження.....	31
1.9 Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму.....	36
2 Принцип дії вентильний реактивних двигунів.....	37
2.1 Пристрій і принцип дії вентильних реактивних двигунів.....	37
2.2 Характеристики вентильних реактивних двигунів.....	43
2.3 Вентильний електродвигун постійного струму.....	46
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	52

## ВСТУП

Сучасна енергетика являє собою складну багаторівневу ієрархічну структуру, призначену забезпечити комфортні умови проживання населення, а також нормальне функціонування промислових підприємств, виробництв і закладів. Лише на основі надійної та ефективної системи забезпечення споживачів різного рівня потрібною енергією та енергетичними ресурсами можливі їх нормальне функціонування і розвиток. Політична та економічна незалежність і безпека держави багато в чому визначаються виробництвом енергетичних ресурсів, їх кількістю та якістю.

Різноманіття форм існування енергії, властивість їх взаємоперетворення дозволяє використовувати для виробництва і споживання енергії різні енерготехнології, енергоресурси та енергоносії, визначає їх взаємозамінність. Енергетична цінність ресурсів, ефективність способів їх перетворення, ступінь досконалості процесів і установок, технологічних стадій енергетичного виробництва інтегрально визначається, ефективністю використання первинних енергоресурсу (коефіцієнтом корисної дії енергоустановки).

Енергетика – галузь народного господарства, що охоплює виробництво, перетворення і використання різних форм енергії. В енергетиці використовують такі основні п'ять видів установок або систем:

- генеруючи – перетворюють потенційну або хімічну енергію природних енергетичних ресурсів на електричну, теплову, механічну або інший вид енергетичного ресурсу (наприклад, турбоустановки, газогенеруючі установки, котли, компресори);

- перетворювальні – змінюють параметри та інші особливості певного виду енергії (трансформаторні підстанції, інверторні електроустановки, трансформатори теплоти та ін.);

- мережі – призначені для передачі і розподілу енергії (електричні, теплові, газові, нафтопроводи, мережі стиснутого повітря та ін.);

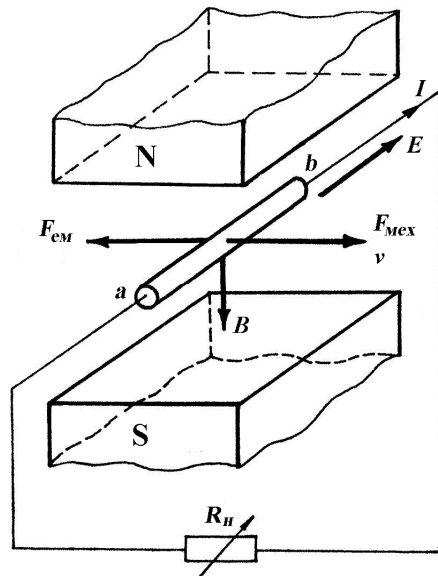
- акумулюванні – призначені для часткового регулювання режиму виробництва енергії (електричні і теплові акумулятори, насосно-акумулюванні гідроелектричні тощо);

- споживаючі – призначені для перетворення енергії до вигляду, в якому її безпосередньо використовують (електричний привід машин, опалювальні установки, промислові печі, світильники та ін.).

Питання, пов'язані з розрахунками, проектуванням, та особливостями експлуатації енергетичних установок, розглянуто в у загальному курсі «Енергетичні установки». Даний лекційний курс присвячений сучасним технологіям виробництва електроенергії на даному етапі розвитку енергетики, обов'язковою складовою реалізації яких є названі вище енергоустановки і, відповідно, теоретичні та практичні питання, пов'язані з їх створенням та експлуатацією.

## ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ, ОБОРОТНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Використання електричних машин в якості двигунів та генераторів є їх основним призначенням, так як пов'язане виключно з взаємним перетворенням електричної та механічної енергії, а трансформатор, призначений для перетворення струмів і напруг однієї величини, в струми і напруги іншої, при незмінній частоті.



Розглянемо на макеті, що складається з двох полюсів і провідника, процес взаємного перетворення механічної і електричної енергії (рис. 1.1). Якщо до провідника *ав* довжиною *l* прикласти механічну силу *F<sub>мех</sub>*, то він буде переміщатися з лінійною швидкістю *v* у напрямі дії сили. Згідно закону електромагнітної індукції в провіднику *ав* буде виникати електрорушійна сила (ЕРС):

$$E = B l v, \quad (1)$$

де *B* – магнітна індукція, Тл.

Рисунок 1.1 – Елементарний генератор

Слід пом'ятати, що напрям ЕРС в провіднику визначається *правилом правої руки*. Долоню правої руки розташовують в магнітному полі так, щоб лінії індукції входили в неї, відігнутий на 90° великий палець показував напрям руху провідника відносно поля, тоді чотири пальці будуть показувати напрям ЕРС (на рис. 1.1 від *a* до *в*).

Якщо замкнути провідник на навантаження *R<sub>n</sub>*, то в колі, під дією ЕРС, в напрямі, що співпадає з її напрямом, виникне *струм I*. Таким чином, провідник, що рухається в магнітному полі, можна розглядати як *елементарний генератор*.

В свою чергу, на провідник зі струмом в магнітному полі, згідно з явищем електромагнітної індукції, діє *електромагнітна сила* (сила Ампера):

$$F_{em} = B l I \quad (2)$$

Напрямок цієї сили визначається *правилом лівої руки*. Долоню лівої руки розміщують назустріч лініям поля, чотири витягнутих пальці – за напрямом струму, тоді великий палець, відігнутий на 90°, покаже напрям сили, на рисунку 1.1, вона направлена справа наліво, тобто, назустріч руху провідника, отже є гальмівною.

Уявимо, що рух провідника рівномірний ( $v = \text{const}$ ), тоді сили механічна і електромагнітна урівноважують одна одну  $F_{\text{мех}} = F_{\text{ем}}$ . Так як  $v \neq 0$ , то, помноживши обидві частини рівняння на швидкість, отримаємо

$$F_{\text{мех}} v = F_{\text{ем}} v. \quad (3)$$

Скориставшись (0.2), підставимо в праву частину значення  $F_{\text{ем}}$ :

$$F_{\text{мех}} v = B l I v = E I \quad (4)$$

У лівій частині цього рівняння маємо значення підведеної до провідника механічної потужності, а в правій – значення електричної потужності, що розвивається в замкнутому колі струмом  $I$  під дією ЕРС  $E$ . Отже, можна стверджувати, що даний макет демонструє, як механічна потужність в генераторі перетворюється в електричну.

Якщо в цьому макеті замість опору навантаження увімкнути (рис. 1.2) джерело живлення з напругою  $U$ , то в провіднику, під дією останньої, виникне електричний струм  $I$  від плюса джерела до мінуса.

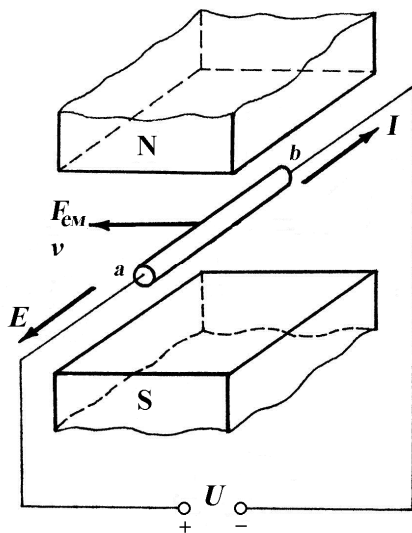


Рисунок 1.2 – Елементарний двигун електричного кола R:

Як і в попередньому випадку на провідник буде діяти сила  $F_{\text{ем}}$ , напрям якої визначиться правилом лівої руки і буде справа наліво. Під дією цієї сили провідник буде переміщатися в тому ж напрямі в якому діє  $F_{\text{ем}}$ , що приведе до появи ЕРС  $E$ . Скориставшись правилом правої руки, побачимо, що напрям ЕРС протилежний напрямам струму та напруги. Отже, згідно з другим законом Кірхгофа частина прикладеної напруги урівноважується тут ЕРС  $E$ , а частина падінням напруги на якорі

$$U = E + I R. \quad (5)$$

Помноживши обидві частини рівняння на струм  $I$  (який, звичайно, не дорівнює нулю), отримаємо:

$$U I = E I + I^2 R. \quad (6)$$

Якщо в цьому рівнянні  $E$  замінити згідно з (0.1), то будемо мати:

$$U I = B l v I + I^2 R, \quad (7)$$

або згідно з (2):

$$U I = F_{\text{ем}} v + I^2 R. \quad (8)$$

В лівій частині отриманого рівняння значення електричної потужності, що надходить в провідник із джерела живлення, а в правій те, в що вона перетворюється. Частково це, згідно з (3), механічна потужність ( $F_{em} v$ ), а частково *електричні втрати* ( $I^2 R$ ), що виникають в провіднику при протіканні струму. Отже, можна вважати, що в цьому випадку макет демонструє роботу *елементарного електродвигуна*.

Аналізуючи роботу макету в обох випадках, можна зробити висновки:

- щоб отримати електричну машину, необхідно мати магнітне поле, електропровідне середовище (провідник) та можливість їх взаємного переміщення;

- при роботі електричної машини як в режимі генератора, так і в режимі двигуна в її провідниках, що перетинають магнітне поле, створюється ЕРС і виникають електромагнітні сили, що діють на провідник зі струмом в магнітному полі;

- взаємне перетворення механічної енергії в електричну і навпаки відбувається в електричній машині в будь-якому напрямі, тобто, одна і та ж машина може працювати і як двигун, і як генератор; ця властивість називається *оборотністю електричної машини*.

Розглянуті «елементарні» генератор та двигун відображують лише принцип використання в них основних законів та явищ електричного струму. Що стосується конструктивного виконання, то більшість електричних машин побудовані на обертовому русі однієї із двох складових частин, яка називається *ротором*. Нерухома частина називається *статором*. Ротор розміщений в розточці статора і відокремлений від нього *повітряним зазором*. В залежності від функціонального призначення, ці дві складові частини поділяють на *індуктор*, та частина машини, яка створює магнітне поле та *якір*, частина, в якій індуктується ЕРС. Розміщення індуктора і якоря на статорі чи роторі залежить від виду та призначення машини, але будь-яке їх розміщення не впливає на принцип роботи.

# 1 МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

## 1.1 Побудова та принцип дії генератора і двигуна постійного струму

Принцип дії генератора оснований на явищі електромагнітної індукції і полягає в тому, що, при обертанні в магнітному полі електропровідної рамки (обмотки), в її провідниках виникає змінна ЕРС, миттєве значення якої, при рівномірному обертанні з кутовою частотою обертання  $\omega$ , визначиться як:

$$e = B l v \sin \omega t, \quad (1.1)$$

де  $t$  – час, с.

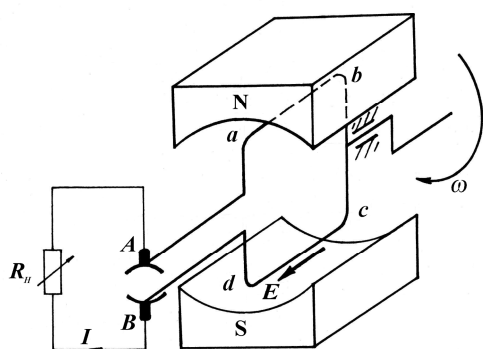


Рисунок 1.1 – Спрощена модель генератора постійного струму

Щоб мати генератор постійного струму, необхідно цю ЕРС випрямити, як випрямляч служить колектор. Розглянемо, як відбувається випрямлення змінної ЕРС на макеті (рис. 1.1), що складається з постійного магніту, між полюсами  $N$  і  $S$  якого розміщена електропровідна рамка  $abcd$ . Кінці рамки з'єднані з двома ізолюваними півкільцями, до яких дотикаються дві нерухомі щітки  $A$  і  $B$ . Рамка  $abcd$  завдяки підшипнику має можливість обертатися разом з півкільцями. ЕРС, що створюється при обертанні рамки, викликає струм в

колі рамка-щітка  $B - R_n -$  щітка  $A$ . Напрямок і величина ЕРС та струму в рамці  $abcd$ , визначаються положенням провідників рамки під полюсами і напрямом обертання. Однак, при обертанні, незалежно від положення провідників під полюсами, з щіткою  $A$  буде з'єднаний через «своє» півкільце провідник, що розташовується під полюсом  $N$ , а з щіткою  $B$  – провідник, що розташований під полюсом  $S$ . Струм зовнішнього кола в даному макеті направлений від щітки  $B$  (її називають *позитивною*) до щітки  $A$  (*негативної*). Зміна струму на опорі навантаження буде лише за величиною, але не за напрямом, тобто, він буде пульсувати від нуля до максимуму (рис. 1.2, б). Якщо в макеті замість однієї, взяти дві, взаємно перпендикулярні рамки з чотирма пластинами, то це дозволить знизити пульсації струму (рис. 1.2, в), а при восьми рамках і 16 пластинах пульсації практично зникнуть взагалі (рис. 1.2, г), тобто, струм буде постійним. Отже, в генераторі постійного струму колектор разом із щітками відіграють роль *механічного випрямляча* змінного струму, що виникає в обмотці якоря, в постійний у зовнішньому колі машини.



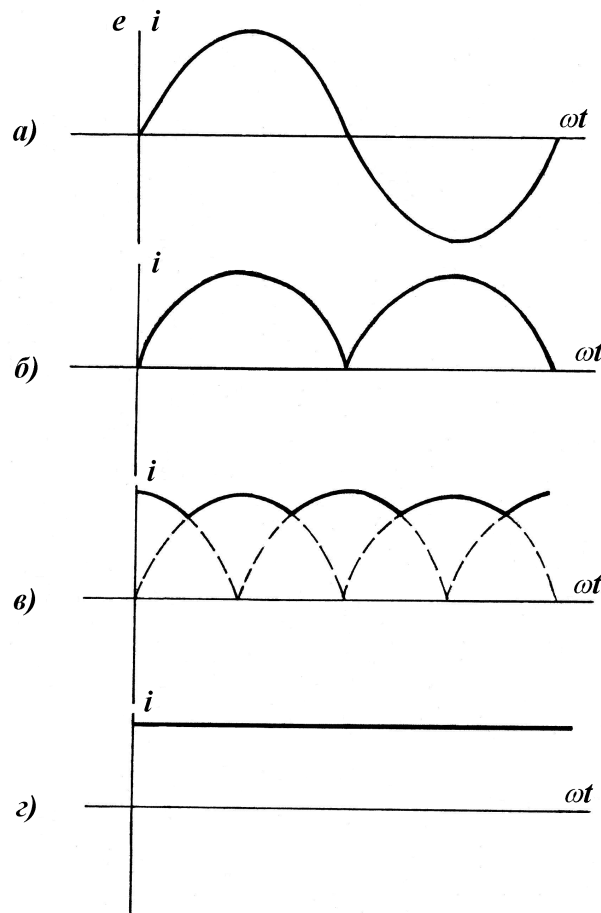


Рисунок 1.2 – Графік зміни ЕРС та струму в рамці (а) та на опорі навантаження (б), (в) (г)

Відповідно до принципу *оборотності*, макет (рис. 1.1) генератора може служити макетом двигуна. Якщо замість опору навантаження увімкнути джерело живлення, то по рамці буде протікати струм і на провідники рамки діяти електромагнітні сили. Вони створять *електромагнітний момент*, під його дією рамка зможе обертатися (рис. 1.3). Завдяки півкільцям та щіткам (наприклад, щітка *A* позитивна, а *B* негативна) постійний струм джерела живлення перетворюється у змінний в рамці. Це дозволяє, при переміщенні провідника з-під одного полюса під інший, змінити напрям струму в провіднику на протилежний, тому що півкільце в цей же час переміщується з-під щітки *A* під щітку *B*. Зміна напрямку струму в провідниках залишається незмінним напрям електромагнітного моменту. Таким чином, при роботі машини в режимі двигуна, колектор разом з щітками відіграє роль механічного *інвертора*, тобто, перетворює постійний струм джерела у змінний в обмотці якоря.

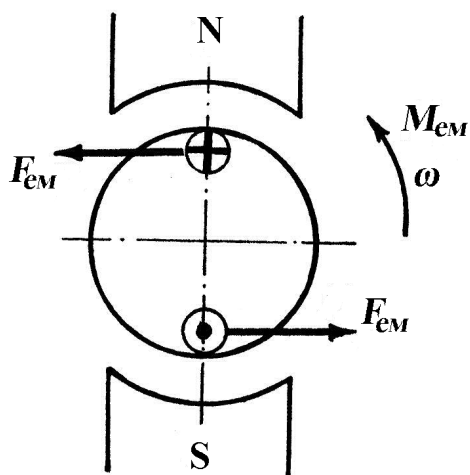


Рисунок 1.3 – До принципу дії двигуна постійного струму

Як і будь-яка електрична машина, постійного струму складається з двох частин: статора і ротора. На статорі розташований індуктор, а на роторі – якор. Статор – індуктор призначений в машині постійного струму для створення магнітного поля, частіше всього електромагнітним шляхом, тобто, *обмоткою збудження*. Ця обмотка виконується у вигляді котушки (з каркасом, чи без нього) з мідного дроту і насаджується на *основний (головний) полюс*. Число основних полюсів в машині –  $2p$  (тоді  $p$  – число пар полюсів). Основні полюси виконуються шляхом штамповки із листів конструкційної сталі товщиною 1–1.5 мм і мають вигляд, що поданий на (рис. 1.4, а).

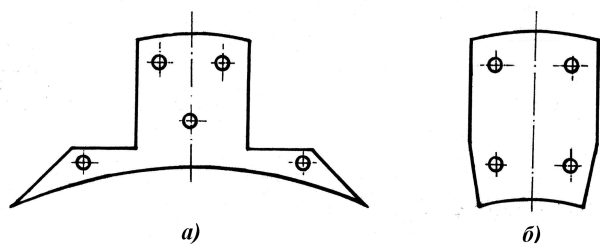


Рисунок 1.4 – Пластини головного (а) та додаткового (б) полюсів

Із пластин набирається пакет полюса, який, в свою чергу, кріпиться до *ярма*. Ярмо служить для замикання магнітного потоку між полюсами. Воно виконується шляхом лиття або відрізається з товстостінної труби. Матеріал чавун чи сталь. Між основними полюсами до ярма кріпляться *додаткові полюси*, які виконуються так, як і

основні полюси, їх пластини мають вигляд, зображений на (рис. 1.4, б).

В машинах малої потужності число додаткових полюсів може бути в два рази менше, ніж основних. Зовні до ярма кріплять клемну коробку та лапи для монтажу машини. В клемну коробку виводять кінці обмоток: Я1, Я2 – обмотка якоря; Ш1, Ш2 – обмотка збудження паралельна; С1, С2 – обмотка збудження послідовна; Д1, Д2 – обмотка додаткових полюсів; К1, К2 – компенсаційна обмотка.

Ярмо, разом з полюсами, лапами та клемною коробкою, називають ще *станиною*. З боків до станини кріплять *підшипникові щити*. Вони призначені для центрівки ротора відносно статора і створення рівномірного повітряного зазору між полюсами та ротором. На одному з підшипникових щитів, він називається *передній*, розміщений *щітковий апарат*. Щітковий апарат складається з *траверзи, щіткових пальців, щіткотримачів та щіток*. Траверза, кільцева або променева, дозволяє зміщувати щітки на деякий кут відносно основного їх положення. Щіткові пальці призначені для ізолювання щіток між собою та від станини; вони виконуються із гетинаксу чи текстоліту прямокутного або круглого перерізу. Щіткотримачі складаються з *щіткового гнізда, пружини та притискувача*. Щіткотримач забезпечує положення щітки на

вісі машини і створює необхідний тиск на колектор. Щітки виконують з мідна - графітової суміші, впресовуючи в неї мідний тросик для з'єднання кола якоря.. Ротор складається з валу, на який насаджений пакет заліза з пазами для укладки обмотки якоря. Пакет заліза набирається (*шихтується*) з окремих листів електротехнічної сталі товщиною 0.35–0.5 мм, що ізолюються один від іншого спеціальним лаком для зниження втрат на *вихрові струми*. Обмотка якоря з мідного дроту вкладається в пази і з'єднується з колектором. Колектор виконується з *колекторних пластин* трапецевидного перерізу, що мають форму, зображену на (рис. 1.5).

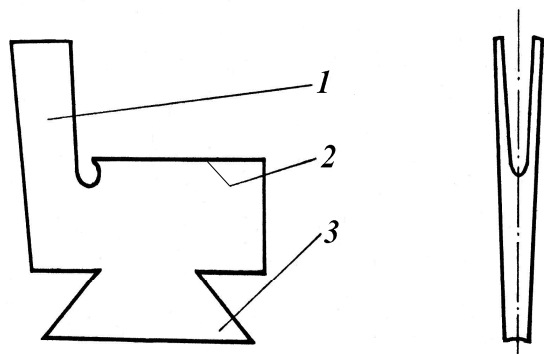


Рисунок 1.5 – 1-колекторна пластина:  
2-робоча поверхня, 3-ластівчин хвіст

Щітка притискується до робочої поверхні колекторної пластини. Півнік необхідний для з'єднання пластини з обмоткою. Колекторні пластини ізолюють між собою і валом ротора *міканітовими прокладками* і стягують спеціальними конусними гайками та шайбами, створюючи колектор, насаджений на вал. На валу машини, зі сторони протилежної колектору, як правило, для покращання охолодження

насаджується вентилятор. Із розглянутого, принципу дії та конструкції машин постійного струму витікає, що обов'язковим елементом цієї машини є колектор, який вмикається між обмоткою якоря та зовнішнім колом. Наявність колектора значно ускладнює конструкцію, погіршує експлуатаційні властивості, підвищує вартість.

## 1.2 Електрорушійна сила обмотки якоря, електромагнітний момент

При обертанні обмотки якоря в магнітному полі машини в кожному її провіднику створюється ЕРС

$$E_{np} = B_{cp} l v, \quad (1.2)$$

де  $B_{cp}$  – середнє значення магнітної індукції, Тл;  $l$  – довжина провідника в пазу, тобто, довжина якоря, м;

$$v = \omega \frac{D_a}{2}, \quad (1.3)$$

де  $\omega$  – лінійна швидкість провідника в магнітному полі, м/с.

Середнє значення індукції пропорційне загальному потоку, що пронизує циліндр якоря і зворотно пропорційне його площині:

$$B_{cp} = \frac{2p\Phi}{\pi D_a l}, \quad (1.4)$$

де  $\Phi$  – магнітний потік одного полюса, Вб;  $D_a$  – діаметр якоря, м.

З урахуванням ( 1.2; 1.3 та 1.4) ЕРС провідника

$$E_{np} = \frac{p}{\pi} \Phi \omega, \quad (1.5)$$

ЕРС обмотки – це та ЕРС, що створюється в одній паралельній вітці  $N/2a$  провідниками, отже,

$$E_a = E_{np} \frac{N}{2a} \quad (1.6)$$

Таким чином:

$$E_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi \omega, \quad (1.7)$$

де  $\frac{pN}{2\pi a} = k$  – електромашинна постійна.

Отже, остаточна формула ЕРС якоря така

$$E_a = k \Phi \omega \quad (1.8)$$

Слід зазначити, що максимальне значення  $E_a$  (1.6) буде мати лише в тому випадку, коли щітки розташовані на *поперечній вісі* машини, яку називають *геометричною нейтраллю*. При зміщенні щіток з нейтралі на кут  $\beta$ , значення е.р.с буде змінюватись:

$$E_a = k \Phi \omega \cos \beta. \quad (1.9)$$

При протіканні струму по провідниках якоря, що розташовані в магнітному полі, на кожен з провідників діє електромагнітна сила

$$F_{em} = B_{cp} l i_a, \quad (1.10)$$

де  $i_a = I_a / 2a$  – струм, що протікає по провіднику,  $A$ .

Враховуючи, що провідники обмотки якоря рівномірно розміщені по циліндру якоря, сили, що діють на кожен з провідників, створюють результуючий електромагнітний момент:

$$M_{em} = F_{em} N \frac{D_a}{2}. \quad (1.11)$$

З урахуванням (1.4, 1.10 та 1.11)

$$M_{em} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a, \quad (1.12)$$

Тобто, враховуючи електромашинну постійну,

$$M_{em} = k \Phi I_a. \quad (1.13)$$

Електромагнітна потужність машини пропорційна електромагнітному моменту та кутовій частоті обертання:

$$P_{em} = M_{em} \omega \quad (1.14)$$

З урахуванням 1.13, маємо:

$$P_{em} = k\Phi I_a \omega \quad (1.15)$$

$$P_{em} = E_a I_a \quad (1.16)$$

Таким чином, електромагнітна потужність, через яку відбувається взаємне перетворювання електричної і механічної потужності, є добутком ЕРС та струму якоря.

### 1.3 Магнітне поле та реакція якоря машин постійного струму

Крім електричного кола, будь-яка електрична машина має магнітне коло, яке в машині постійного струму складається з п'яти ділянок:

- головний полюс, виконується з пластин легованої холоднокатаної сталі товщиною 1–1,5 мм;
- повітряний зазор, хоча і має мінімальну довжину, але опір потоку найбільший саме на цій ділянці;
- зубцева зона виділена окремою ділянкою, враховуючи незначний переріз (через наявність пазів) яким замикається магнітний потік;
- спинка якоря, набрана з пластин електротехнічної сталі товщиною 0.35÷0.5 мм (пластини для зниження втрат на вихрові струму, ізольовані спеціальним лаком);
- ярмо – товстостінна труба, або відливка з чавуну.

Провівши розрахунок магнітного кола машини, визначають параметри обмотки збудження, *магніторушійна сила (м. р. с.)*, якої визначається як сума магнітних напруг на ділянках магнітного кола:

$$F_{o.z.} = 2F_{\delta} + 2F_z + 2F_m + F_a + F_{я} \quad (1.17)$$

де  $F_{\delta}$ ,  $F_z$ ,  $F_m$ ,  $F_a$ ,  $F_{я}$  – магнітні напруги повітряного зазору, зубцевої зони, головного полюса, спинки якоря та ярма відповідно.

Слід зазначити, коли машина має компенсаційну обмотку, до магнітного кола вносять шосту ділянку – зубцева зона основного полюса.

Порядок розрахунку полягає у визначенні магнітного потоку полюса при заданому значенні ЕРС обмотки якоря  $E_a$  [з (1.7)]:

$$\Phi = \frac{2\pi a E_a}{pN\omega} \quad (1.18)$$

Знаючи магнітний потік, незмінний на усіх ділянках кола (за винятком потоку полюса, який вищий від значення  $\Phi$  на величину потоку розсіяння, що враховується коефіцієнтом розсіяння) визначають індукцію на кожній ділянці

$$B = \Phi/S_i \quad (1.19)$$

де  $B_i$  та  $S_i$  – індукція та площа перерізу  $i$ -тої ділянки.

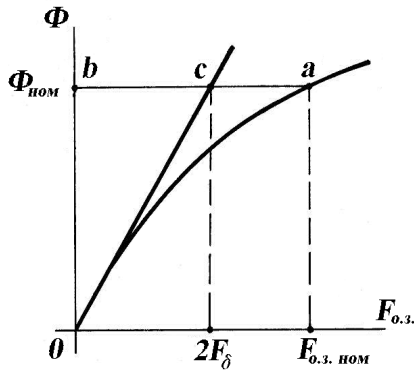


Рисунок 1.6 – Магнітна характеристика

За таблицями чи кривими намагнічування для феромагнітного матеріалу відповідної ділянки визначається напруженість поля  $H_i$ , а потім магнітна напруга  $F_i$ :

$$F_i = H_i l_i, \quad (1.20)$$

де  $l_i$  – довжина відповідної ділянки.

Якщо задатись кількома значеннями потоку, наприклад:  $0.5 \Phi_{\text{ном}}$ ,  $0.75 \Phi_{\text{ном}}$ ,  $\Phi_{\text{ном}}$ ,  $1.25 \Phi_{\text{ном}}$ , то можна побудувати магнітну характеристику машини (рис. 1.6).

Пряма  $oc$  характеризує прямолінійну зміну магнітного потоку в повітряному

зазорі. Відношення відрізків  $av$  та  $bc$  називають коефіцієнтом насичення магнітного кола машини:

$$K_\mu = ab/bc = F_{\text{о.з. ном}} / 2F_\delta \quad (1.21)$$

де  $F_{\text{о.з. ном}}$  – номінальна магніторушійна сила, що створюється обмоткою збудження,  $A$ .

Для машин постійного струму  $K_\mu \approx 1.15 \div 1.35$ . Якщо  $K_\mu < 1.15$ , то в машині буде перевитрата феромагнітного матеріалу (машина працює в ненасиченому режимі), якщо  $K_\mu > 1.351$  – перевитрата міді (магнітна система перенасичена).

При роботі машини в її магнітній системі створюється обмоткою збудження основний магнітний потік  $\Phi$ . Якщо машина працює в режимі *холостого ходу* (ХХ), то цей потік буде направлений по повздовжній вісі машини ( $d$ ) симетрично їй. На (рис. 1.7, а) цей потік для простоти зображено чотирма магнітними силовими лініями.

При роботі машини під навантаженням, струм протікаючи по обмотці якоря, створює своє поле – *поле якоря*. На (рис. 1.7, б) це поле показано однією магнітною силовою лінією навколо провідника, що замінює в даному випадку обмотку якоря.

Дія поля якоря на основний магнітний потік машини називається *реакцією якоря*.

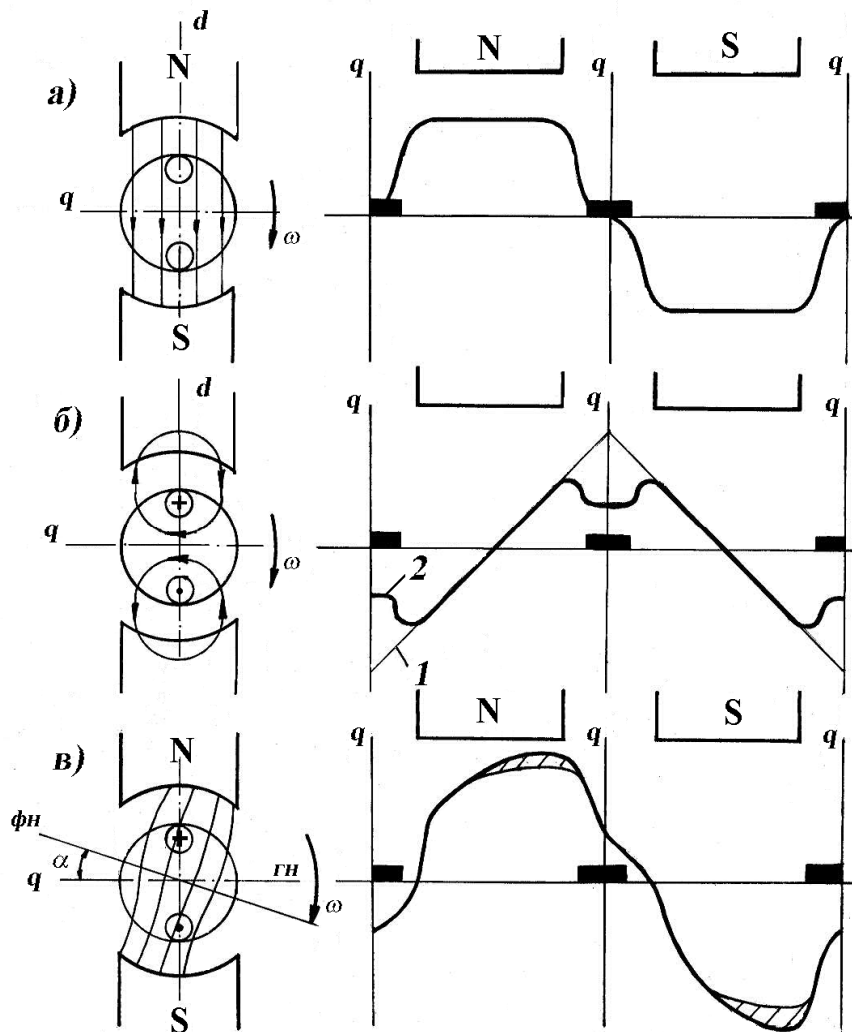


Рисунок 1.7 – Магнітне поле та розподілення магнітної індукції в повітряному зазорі

В результаті реакції якоря магнітне поле викривляється і стає несиметричним відносно вісі  $d$ , (рис. 1.7, в).

На (рис. 1.7) реакція якоря пояснюється методом суперпозиції:

- (рис. 1.7, а) зображує основне поле при відсутності струму в якорі, а отже, і його поля;

- (рис. 1.7, б) показує, визначене за правилом свердлика, магнітне поле, що створює виток (обмотка) якоря при відсутності струму збудження (полюси присутні лише як феромагнітний матеріал по вісі  $d$ ). Напрямок струму витка такий, який створила б ЕРС, що наводиться в провідниках (рис. 1.7, а) в режимі генератора при обертанні ротора за годинниковою стрілкою. Розподіл індукції в повітряному зазорі 1 мав би місце коли б навколо циліндра якоря був циліндричної форми статор, як, наприклад, в машині змінного струму. Реально індукція розподіляється по кривій 2, що має «провали» між полюсами;

- (рис. 1.7, в) – результуюче поле та розподілення індукції в повітряному зазорі, тобто, накладання (рис. 1.7, б) на (рис. 1.7, а). Зліва під полюсом  $N$  та справа під  $S$  поле ослабло і, навпаки, справа під  $N$  і зліва під  $S$  підсилюється.

«Фізична нейтраль» – **фн** – лінія, перпендикулярна лініям поля, змістилась з вісі **q** («геометрична нейтраль» – **гн**) на кут  $\tilde{\alpha}$ .

Зображені на (рис. 1.7) поле та індукція в повітряному зазорі справедливі лише для машини з ненасиченою магнітною системою. В цьому випадку поле лише викривляється, а результуючий потік не змінюється: скільки зменшилось потоку під *набігаючим* краєм полюса (на одну магнітну силову лінію рис. 1.7, в) стільки ж і збільшилось під *збігаючим*.

Якщо машина насичена, реакція якоря приведе до зниження результуючого магнітного поля, тому що один край полюса буде розмагнічуватись, а інший на стільки ж підмагнітитись, через насичення системи, не зможе. Це зниження відповідає заштрихованим ділянкам на (рис. 1.7, в). Таким чином, реакція якоря приводить не тільки до викривлення основного поля, а й до його зниження (як правило, машини працюють в насиченому режимі), що негативно позначається на роботі як генератора (знижується ЕРС), так і двигуна (зменшується електромагнітний момент).

Слід зазначити, що (рис. 1.7) демонструє реакцію якоря при роботі машини в режимі генератора. Але цей же рис. буде відображати реакцію якоря двигуна, якщо змінити напрям обертання (в даному випадку проти годинникової стрілки) ротора.

При зміщенні щіток з геометричної нейтралі, наслідки реакції якоря змінюються. При цьому основний магнітний потік може як ослаблятись, так і підсилюватись.

Щоб позбавитись від шкідливого впливу реакції якоря на машину, застосовують при проектуванні один з двох засобів.

*Перший* – застосування компенсаційної обмотки. Така обмотка розташовується в пазах полюсних наконечників, вмикається послідовно з обмоткою якоря і струм, що по ній протікає, створює м.р.с., яка направлена назустріч м.р.с., що створює якір і автоматично компенсує її. Застосування компенсаційної обмотки робить більшою вартість машини, тому її застосовують лише в потужних машинах 150–500 кВт при  $U > 440$  В.

*Другий* – збільшення повітряного зазору між якорем та краями головних полюсів. В цьому випадку машина буде насиченою лише по вісі полюсів, де повітряний зазор мінімальний, а край кожного полюса ненасичений і допускає зростання потоку при реакції якоря. Цей спвісіб значно знижує розмагнічувальну дію реакції якоря, але недоліком його є необхідність збільшувати намагнічувальну силу обмотки збудження.

#### 1.4 Комутація в машинах постійного струму

Наявність колектора в машині постійного струму ускладнює не тільки конструкцію машини, але й процес її експлуатації. Пов'язано це з тим, що колектор і щітки виконують роль перетворювача струму із змінного в постійний (генератор) та, навпаки, із постійного в змінний (двигун). Під час роботи машини секції обмотки якоря, з'єднані між собою послідовно в паралельні вітки, перемикаються із однієї паралельної вітки в іншу. Процес



такого перемикавання і пов'язані з ним явища, що відбуваються в секціях, які перемикаються, а також між щітками і колектором, називається *комутацією*.

Секція, кінці якої з'єднані з колекторними пластинами, що замикаються щітками, називається *комутованою секцією*.

Час, за який відбувається комутація в секції, і щітка повністю переходить з однієї колекторної пластини на іншу, називається *періодом комутації*,  $T_k$ .

Враховуючи незначну ширину колекторної пластини і досить значні частоти обертання, період комутації є дуже малою величиною, складає лише тисячні долі секунди.

Перемикавання секції, з однієї паралельної вітки в іншу, супроводжується зміною струму в секції на протилежний і замиканням секції накоротко, тому може викликати *іскріння* між щіткою і колекторною пластиною, де таке замикання (розмикання) відбувається. Величина та інтенсивність іскріння залежить від досить багатьох факторів і причин, основні з них є:

- *механічні причини* – слабкий тиск щіток на колектор, еліптичність або негладка поверхня колектора, забруднення поверхні колектора, міканітова ізоляція виступає над мідними пластинами, слабе закріплення траверси, пальців чи щіткотримачів, а також інші причини, які викликають порушення електричного контакту між щіткою і колектором;

- *потенційні причини* іскріння виникають при перевищенні допустимого значення напруги між суміжними колекторними пластинами, що найбільш небезпечно, так як може привести до виникнення електричної дуги;

- *комутаційні причини* іскріння створюються фізичними процесами, що відбуваються в машині при перемикаванні секції із однієї паралельної вітки до іншої.

Частіше всього іскріння зумовлене усіма цими факторами в комплексі.

На заводі, де виготовляється машина, в ній налаштовують *темну* комутацію, що виключає будь-яке іскріння. Але в процесі роботи машини, колектор і щітки зношуються, це може привести до появи іскріння. Якщо іскріння незначне, то робота машини можлива. В цілому, іскріння під збігаючим краєм щітки оцінюють ступеню іскріння (класом комутації).

Ступінь 1 – іскріння відсутнє (темна комутація).

Ступінь  $1\frac{1}{4}$  – слабе іскріння під незначною частиною щітки, яке не викликає почорніння колектора і появи нагару на щітках.

Ступінь  $1\frac{1}{2}$  – слабе іскріння під значною частиною щітки, що викликає сліди почорніння на колекторі, яке легко стирається з поверхні колектора за допомогою бензину, чи іншого розчинника, а також сліди нагару на щітках.

Ступінь 2 – іскріння під всією щіткою. Робота машини допускається тільки при короткочасних поштовхах навантаження і при перевантаженні. Приводить до появи слідів почорніння на колекторі, яке не зникає після протирання колектора бензином, і до появи нагару на щітках.

Ступінь 3 – значне іскріння під всією щіткою з появою іскор, що вилітають з-під щітки. Таке іскріння приводить до значного почорніння, яке можна зняти лише за допомогою наждачної шкурки, а також до підгоряння і руйнування щіток. Допускається тільки під час прямого (безреостатного) пуску

або реверсування, якщо при цьому колектор і щітки залишаються в стані, що дозволить подальшу роботу.

Складність процесів комутації не дозволяють розглядати її в загальному вигляді. Тому для отримання аналітичних і графічних залежностей, що пояснюють комутацію, допускають, що ширина щітки рівна колекторній подільці; щітки розміщені на геометричній нейтралі; електричний опір комутованої секції і місць її приєднання до колектора, в порівнянні з опором перехідного контакту «щітка-колектор», настільки малий, що ним можна знехтувати (звичайно таке співвідношення відповідає дійсності).

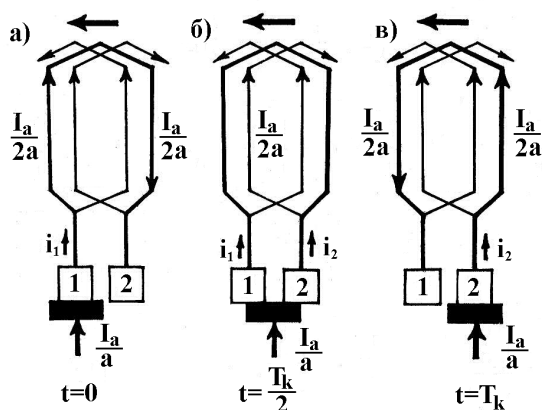


Рисунок 1.8 – Перехід комутованої секції з однієї паралельної вітки в другу

комутації ( $t = T_k$ ) щітка повністю перейшла на колекторну пластину 2, і, як наслідок, комутована секція перемкнулась в ліву паралельну вітку, струм в ній знову став рівним  $I_a/2a$ , але напрям струму змінився на протилежний.

Отже, за період комутації струм у комутованій секції змінюється на протилежний, а його величина, за абсолютним значенням, залишається незмінною.

Якщо графік зміни струму в комутованій секції за період комутації є

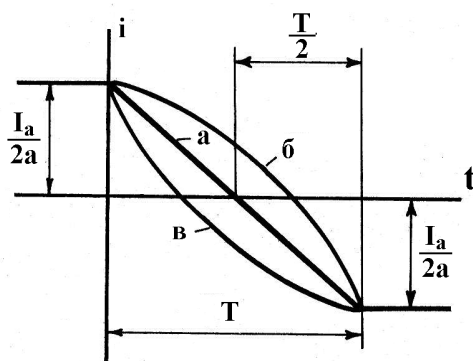


Рисунок 1.9 – Графік зміни струму за період комутації

На початку комутації (рис. 1.8, а) комутована секція, виділена більш жирною лінією, увімкнена в праву паралельну вітку і струм в ній  $I_a/2a$  протікає за напрямом годинникової стрілки.

В процесі комутації щітка поступово збігає з пластини 1 і набігає на пластину 2, в результаті чого секція виявляється закороченою і струм в ній зменшується до нуля, коли щітка рівномірно перекриває обидві пластини ( $t = T_k/2$ ). По закінченні

пряма лінія, то комутацію називають *прямолінійною* (рис. 1.9, а). Таку комутацію ще називають *ідеальною*, тому що перехід щітки з однієї колекторної пластини на іншу відбувається без іскріння на колекторі.

Фізично це можна пояснити тим, що густина струму в контакті «щітка-пластина» за весь період комутації залишається незмінною, тому струм через першу пластину знижується, а через другу зростає, пропорційно площі перекриття пластини. Таким чином,

при  $t = T_k/2$  струми через обидві колекторні пластини, що закорочують секцію, рівні, а в самій закороченій секції струм дорівнює нулю. В кінці комутації, коли щітка відривається від пластини 1 струм через неї зменшився до нуля, площа

дотику пластини і щітки рівна нулю, а отже, відсутнє і іскріння. Незмінність густини струму в контакті «щітка-пластина» може бути лише за умови, коли в комутованій секції не наводиться ЕРС, або сума ЕРС, що наводяться, дорівнює нулю:

$$\sum e_c = 0, \quad (1.22)$$

де  $e_c$  – ЕРС, що наводяться в комутованій секції.

Розглянемо тепер, які ЕРС будуть створюватись в комутованій секції і як вони впливають на процес зміни струму в секції зокрема, і на комутацію в машині взагалі.

В сучасних машинах, як уже зазначалось, період комутації дуже малий, тому швидкість зміни струму в часі досить значна, а це приводить до появи ЕРС, які зумовлені зміною струму.

Враховуючи, що секція обмотки має *індуктивність*  $L_c$ , при зміні струму, в ній буде виникати ЕРС самоіндукції:

$$e_L = -L_c di/dt, \quad (1.23)$$

де  $i$  – струм в комутованій секції.

Звичайно, в кожному пазу якоря розташовано кілька активних сторін різних секцій. При цьому, враховуючи, що крок обмотки ( $y_1 = \tau$ ) повний, в кожній із цих секцій, в свою чергу, буде відбуватися комутація, а це приведе до появи змінного магнітного потоку кожної із цих сторін і, як наслідок, до появи ЕРС взаємоіндукції:

$$e_M = -M_c di/dt, \quad (1.24)$$

де  $M_c$  – взаємоіндуктивність секцій, що комутуються одночасно.

При положенні щіток на геометричній нейтралі машини і при відсутності додаткових полюсів в зоні секцій, що комутуються, магнітна індукція буде мати, через реакцію якоря, деяке значення  $B_{р.я.}$ . Під дією цієї індукції в комутованій секції буде створюватись ще одна ЕРС, так звана, ЕРС *крутіння*:

$$e_k = B_{р.я.} 2l W_s v, \quad (1.25)$$

де  $l$  – довжина пазових (активних) частин секції;  $W_s$  – число витків у секції;  $v$  – лінійна швидкість руху секції. Перші дві ЕРС  $e_L$  та  $e_M$ , згідно з правилом Ленца, завжди направлені назустріч зміні струму, тому їх суму ще називають реактивною ЕРС

$$e_p = e_L + e_M = -(L_c + M_c) di/dt. \quad (1.26)$$

Ця ЕРС завжди буде *уповільнювати* зміну струму, змінити її напрям неможливо. ЕРС крутіння, на відміну від реактивної, може мати різні напрями, в залежності від полярності поля в зоні комутації. Якщо додаткові полюси в

машині відсутні і щітки розташовані на геометричній нейтралі, то напрям  $e_k$  співпадає з напрямом  $e_p$ . В цьому випадку в контурі комутованої секції діє сума ЕРС :

$$\Sigma e = e_k + e_p, \quad (1.27)$$

тому загальний струм комутованої секції слід розглядати як суму двох струмів :

$$i = i_{np} + i_\delta \quad (1.28)$$

де  $i_{np}$  – струм, що уявляє собою струм прямолінійної комутації;

$i_\delta$  – додатковий струм, який виникає внаслідок дії в комутованій секції ЕРС  $e_p$  та  $e_k$ .

$$i_\delta = \Sigma e / (R_1 + R_2), \quad (1.29)$$

де  $R_1$  і  $R_2$  – відповідно опори контактів «щітка-пластина 1» та «щітка-пластина 2».

Додатковий струм приводить до зміни густини струмів через колекторні пластини, що замикаються щіткою. За умов, що розглядаються, густина струму під збігаючим краєм щітки буде зростати, а під набігаючим – зменшуватись, тому що додатковий струм направлений проти зміни струму прямолінійної комутації, уповільнюючи його зміну і перетворюючи прямолінійну комутацію в криволінійну уповільнену (рис. 1.9, б). В середині такої комутації струм в комутованій секції не дорівнює нулю, як при прямоліній, а дорівнює  $i_\delta$ . Щоб цей струм знизився до нуля, необхідний якийсь час, наприклад,  $2/3 T$ . Тоді за  $1/3 T$ , що лишається, струм повинен зростати до  $I_a/2a$  в протилежному напрямі, що й приводить до підвищення його густини під збігаючим краєм. Коли щітка відривається від колекторної пластини значення струму ще не дорівнює нулю, тому енергія, що при цьому виділяється, витрачається на створення електричної дуги між збігаючим краєм щітки і збігаючою колекторною пластиною. Як видно із (1.29) іскріння під збігаючим краєм щітки буде тим більше, чим більша індуктивність секції і додатковий струм комутації. Отже, для покращання комутації слід знижувати індуктивність секції (наприклад, зниження числа витків) або, що ефективніше, зниження додаткового струму.

Основна причина незадовільної комутації в машинах постійного струму – додатковий струм комутації.

$$i_\delta = \Sigma e / \Sigma R_k \quad (1.30)$$

де  $\Sigma R_k$  – сума електричних опорів, якими замикається додатковий струм: опори секції, місць пайки в півниках колекторних пластин, перехідного контакту між колекторними пластинами і щіткою і, нарешті, самої щітки.

Отже, щоб знизити додатковий струм необхідно або знизити  $\Sigma e$ , або підвищити  $\Sigma R_k$ . Звідси впливає ряд способів покращання комутації.

**Вибір щіток.** З точки зору забезпечення задовільної комутації раціонально використовувати щітки з великим опором  $R_{щ}$ . Однак, допустима густина струму в таких щітках незначна, що веде до збільшення розміру як щітки, так і колектора і додаткових витрат міді. Тому такі щітки використовують лише в машинах високої напруги з незначним робочим струмом. В машинах постійного струму використовують графітні, електрографітовані, вугільно-графітні та мідно-графітні щітки. Вибирають щітки у відповідності з рекомендаціями, які вироблені на основі багатолітнього досвіду проектування та експлуатації машин постійного струму.

Найбільш широко застосовують в машинах постійного струму напругою 110–440 В електрографітовані щітки. Збільшенню перехідного опору, а отже, і покращанню комутації, сприяє *політура* колектора – тонка оксидна плівка на поверхні колектора, що має підвищений електричний опір.

**Зменшення реактивної ЕРС** Суттєвий вплив на сумарну ЕРС в комутованій секції виявляє реактивна ЕРС  $e_p = e_L + e_M$ . ЕРС взаємоіндукції  $e_M$  суттєво залежить від ширини щітки і чим ширша щітка, тим більше число пластин вона водночас перекриває, а отже, і більше секцій одночасно комутуються, і тим більша ЕРС взаємоіндукції  $e_M$ . В той же час вузькі щітки також не бажані, через малу механічну міцність, а також тому, що для створення необхідної площі контакту потрібно збільшувати довжину щітки, а це приведе до збільшення і довжини колектора. Найбільш раціональні щітки шириною 2–3 колекторні поділки.

Тип обмотки також значно впливає на величину ЕРС взаємоіндукції. Так, якщо обмотка має укорочений крок ( $y_1 < \tau$ ), то активні сторони секції, що водночас комутуються, виявляться в різних пазах, і це значно знижує ЕРС взаємоіндукції.

Зниження реактивної ЕРС, чи її повна компенсація, можлива створенням у зоні комутації (по вісі щіток) магнітного поля відповідної полярності і величини.

Створюється таке поле додатковими полюсами або зсувом щіток з геометричної нейтралі.

**Додаткові полюси.** Призначення додаткових полюсів – створити в зоні комутації магнітне поле такої величини і напрямку, щоб цим полем в комутованій секції створювалась така ЕРС крутіння  $e_k$ , яка б компенсувала реактивну ЕРС  $e_p$ .

В машині додаткові полюси розміщують між основними, щітки при цьому установлюють на геометричній нейтралі. Всі машини постійного струму потужністю більше 1 кВт мають додаткові полюси, число яких таке ж, як і основних, або в два рази менше.

Розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі при наявності додаткових полюсів зображений на (рис. 1.10).

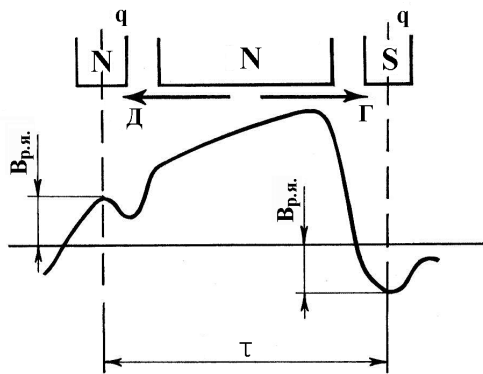


Рисунок 1.10 – Результуюче магнітне поле в повітряному зазорі машини з додатковими полюсами в режимі генератора (Г) і двигуна (Д)

Якщо м.р.с. додаткових полюсів зробити більшою, ніж потрібно для компенсації ЕРС  $e_p$ , тобто, коли  $e_k$  стане більшою, ніж  $e_p$ , то сумарна ЕРС змінить свій знак, а додатковий струм комутації змінить свій напрям на протилежний в порівнянні з тим, який він мав при криволінійній уповільненій комутації (рис. 1.9, б). В цьому випадку графік зміни струму в комутуваній секції прийме вигляд (рис. 1.9, в), тобто, комутація стане *криволінійною прискореною*. При такій комутації струм в комутуваній секції досягне нульового значення за час  $t < T_k/2$ , а це приведе до зниження густини струму під збігаючим краєм щітки, та підвищення під набігаючим, і, як наслідок, іскріння під набігаючим краєм щітки. Слід

зазначити, що іскріння під набігаючим краєм щітки є більш небезпечним експлуатації машини, ніж іскріння збігаючого краю щітки, тому що іскри набігаючого краю затягуються під щітку, іонізують простір між щіткою і пластиною, що збільшує ступінь іскріння.

Для забезпечення безіскрової роботи машини, обмотка додаткових полюсів повинна бути розрахована на таку м.р.с., яка б забезпечила компенсацію реактивної ЕРС в комутуваній секції. Щоб така компенсація забезпечувалась при будь-яких навантаженнях, обмотку додаткових полюсів умикають послідовно з обмоткою якоря.

Додаткові полюси забезпечують задовільну комутацію в машині лише в межах номінального навантаження. При перевантаженнях додаткові полюси перенасичуються, що, в кінцевому результаті, приведе до уповільнення комутації.

**Отримання комутаційного поля зміщенням щіток.** В машинах постійного струму потужністю до 1 кВт, що виконуються без додаткових полюсів, комутаційне поле створюють зсувом щіток з геометричної нейтралі за фізичну по напрямку обертання машини, яка працює в режимі генератора і проти напрямку обертання – в режимі двигуна.

При такому зсуві можна вибрати точку в якій, при даному навантаженні, комутаційне поле буде забезпечувати компенсацію реактивної ЕРС і без іскрової роботу машини.

Недоліки цього способу покращання комутації:

- при зміні навантаження необхідно змінювати положення щіток;
- зсув щіток з геометричної нейтралі підсилює розмагнічувальну дію реакції якоря;
- при реверсуванні машини зсув щіток неможливий, так як зміна напрямку обертання;
- вимага зміни і напрямку зсуву щіток.

## 1.5 Рівняння генераторів постійного струму

Основні співвідношення між величинами, що характеризують роботу машини як генератора, можна виразити у вигляді рівнянь. Для загальної точки ланцюга якоря, обмотки збудження та опору навантаження рівняння складаються за першим законом Кірхгофа для генераторів різних способів збудження. Рівняння ЕРС справедливе для генераторів незалежно від способу збудження. Це рівняння складається на основі другого закону Кірхгофа для контуру генератора, до якого входить обмотка якоря та навантаження. ЕРС, що створюється в якорі,  $E_a$  урівноважується падінням напруги на опорі елементів, увімкнених послідовно з обмоткою якоря, та на опорі навантаження:

$$E_a = I_a R_a + IR_n, \quad (1.31)$$

тут

$$R_a = R_{\text{я}} + R_{\text{д}} + R_{\text{к.о}} + R_c + R_{\text{щ}}, \quad (1.32)$$

де  $R_{\text{я}}$  – опір безпосередньо обмотки якоря,  $R_{\text{д}}$  – опір обмотки додаткових полюсів,  $R_{\text{к.о}}$  – опір компенсаційної обмотки,  $R_c$  – опір послідовної обмотки збудження,  $R_{\text{щ}}$  – опір контакту «щітка – колектор». Слід зазначити, що деякі з цих опорів можуть бути відсутні в генераторах різних типів, при відсутності відповідних елементів. Падіння напруги на опорі навантаження  $IR_n$  називають, звичайно, *напругою генератора  $U$* , отже:

$$E_a = U + I_a R_a. \quad (1.33)$$

Ця ЕРС зумовлює появу струму якоря:

$$I_a = \frac{E_a - U}{R_a}, \quad (1.34)$$

Суттєве значення має *рівняння рівноваги моментів*, що діють у генераторі. В режимі НХ (робота машини при відсутності навантаження) момент привідного двигуна  $M_I$  незначний і зумовлений гальмівними моментами від сил тертя і вихрових струмів в залізі якоря. Цей момент називають *моментом холостого ходу,  $M_0$* .

При роботі навантаженого генератора на його якорі діє електромагнітний момент  $M_{\text{ем}}$  (1.13), який також направлений назустріч моменту привідного двигуна. Якщо частота обертання незмінна ( $n = \text{const}$ ), обертовий момент привідного двигуна урівноважується в режимі НХ моментом  $M_0$ , а при навантаженні – сумою протидіючих моментів: моментом НХ  $M_0$  і електромагнітним моментом  $M_{\text{ем}}$ , тобто:

$$M_I = M_0 + M_{\text{ем}} \quad (1.35)$$

Якщо обидві частини рівняння (1.35) помножити на кутову частоту обертання  $\omega$ , отримаємо рівняння рівноваги потужностей:

$$P_1 = P_0 + P_{em}, \quad (1.36)$$

де  $P_1 = M_1 \omega$  - механічна потужність, що підводиться до генератора від привідного двигуна;  $P_0 = M_0 \omega$  - потужність, що підводиться до генератора в режимі НХ, тобто, *втрати НХ*, ніякої корисної роботи при НХ генератор не виконує;  $P_{em} = M_{em} \omega$  - електромагнітна потужність, яка згідно (1.16) може виражатись і як добуток ЕРС та струму якоря. Для генератора з паралельним збудженням будемо мати:

$$P_{em} = (U + I_a R_a) (I + I_z) = UI + UI_z + I_a^2 R_a = P_2 + P_3 + P_{ea}, \quad (1.37)$$

де  $P_2 = UI$  - корисна електрична потужність генератора;  $P_3 = UI_z$  - потужність, що витрачається на збудження - *втрати в обмотці збудження*;  $P_{ea} = I_a^2 R_a$  - електричні втрати на усіх елементах, що послідовно увімкнені в коло якоря, враховуючи втрати в контакті «щітка-колектор».

Підставивши (1.37) в (1.36) і, враховуючи що:

$$P_0 = P_{mex} + P_{mag}, \quad (1.38)$$

де  $P_{mex}$  - механічні втрати, зумовлені силами тертя та вентиляції;  $P_{mag}$  - втрати магнітні на вихрові струми та гістерезис (перемагнічення) пластин якоря, отримаємо:

$$P_1 = P_2 + P_{mex} + P_{mag} + P_{ea} + P_3 + P_{dod}. \quad (1.39)$$

Це рівняння і є рівнянням балансу потужностей генератора з самозбудженням, в ньому  $P_{dod} = 1 \div 2 \%$  від  $P_{ном}$  - додаткові втрати, які важко врахувати, і тому задають у % від номінальної потужності.

## 1.6 Характеристики генераторів постійного струму незалежного, паралельного, послідовного та змішаного збудження

Спосіб збудження генераторів визначає їх властивості, які простіше всього виражаються графічним шляхом, тобто, у вигляді кривих, так званих, *характеристик генераторів*.



**Генератор незалежного збудження.** Схема увімкнення генератора незалежного збудження показана на (рис. 1.11). Реостат  $R_{pz}$  увімкнений в коло збудження, дозволяє змінювати струм збудження  $I_z$ , а отже, і основний магнітний потік машини. Джерелом збудження може бути акумулятор, випрямляч чи інший генератор постійного струму, який в цьому випадку називають *збуджувачем*.

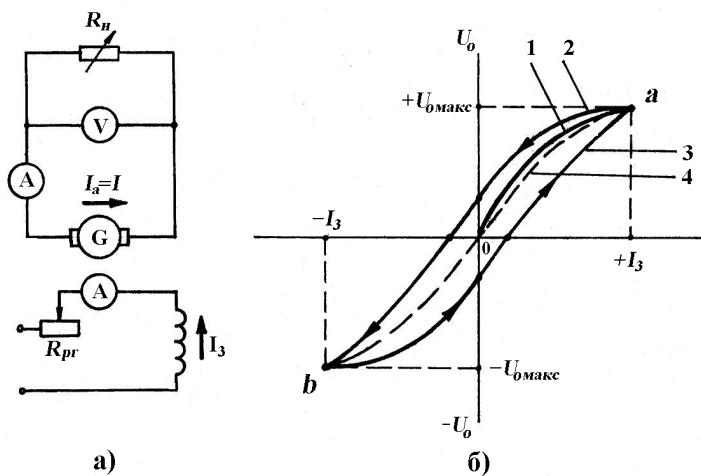


Рисунок 1.11 – Принципова схема (а) і характеристика ХХ (б) генератора незалежного збудження

**Характеристика холостого ходу.** Цю характеристику знімають в режимі ХХ ( $I_a = 0$ ). Генератор приводять до обертання з номінальною частотою, яку підтримують незмінною на протязі всього дослід. Поступово збільшують струм збудження  $I_z$  від нуля до значення, при якому напруга  $U = 1.15 U_{ном}$ . Отримують дані для побудови кривої 1 (рис. 1.11, б).

Початкова ордината кривої 1 не дорівнює 0, що пояснюється дією незначного магнітного потоку *залишкового магнетизму*, що зберігся від попереднього намагнічування. Зменшивши струм збудження до нуля, а потім, змінивши його напрям на протилежний, отримують криву 2, що називається *низхідною віткою* характеристики.

Низхідна вітка проходить вище, ніж крива 1, що пояснюється зростанням залишкового намагнічування. Надалі дослід проводять в зворотному напрямі, зменшуючи струм збудження від  $-I_z$  до 0, а потім збільшуючи до  $+I_z$ , отримують *висхідну вітку* характеристики 3. Низхідна та висхідна вітки утворюють *петлю гістерезису*. *Розрахункова характеристика ХХ* 4 уявляє собою середню лінію між кривими 2 та 3.

Прямолінійна частина характеристики ХХ відповідає ненасиченій магнітній системі машини. Точка номінальної напруги генератора лежить на середньо насиченій частині характеристики. Збільшення стуму збудження більше значення  $I_{з0ном}$ , який створює при ХХ, номінальну напругу  $U_{ном}$ , перенасичує магнітну систему і викривляє характеристику.

Якщо струм навантаження не дорівнює нулю, наприклад,  $I = I_{ном}$  мають навантажувальну характеристику, крива якої буде проходити нижче, ніж характеристика ХХ. При цьому відстань між кривими характеристик ХХ і навантажувальною буде збільшуватись при збільшенні струму збудження (рис. 1.12, а).

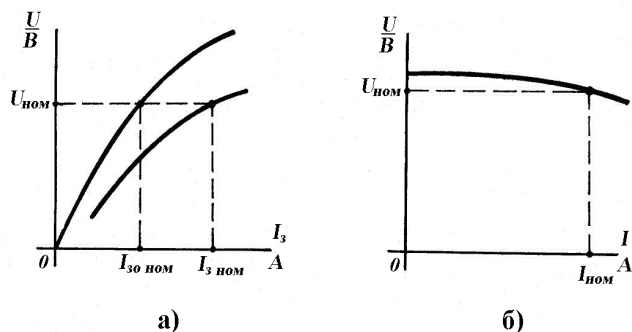


Рисунок 1.12 – Навантажувальна (а) та зовнішня (б) характеристики генератора незалежного збудження

### Зовнішня характеристика генератора.

Ця характеристика уявляє залежність  $U = f(I)$  при  $n = const$  та  $R_z = const$ . Дані для її побудови знімають таким чином. Генератор навантажують до номінального струму при номінальній напрузі, потім зменшують навантаження і записують показання приладів, за отриманими даними будують

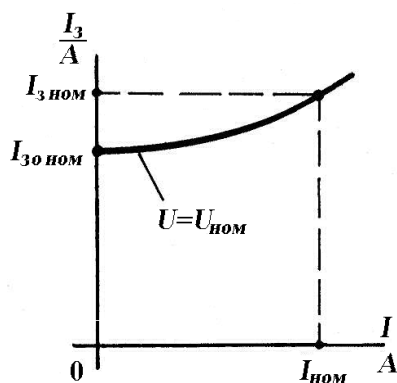
криву (рис. 1.12, б). Зменшення напруги при зростанні навантаження пояснюється падінням напруги в колі якоря та розмагнічувальною дією реакції якоря. Нахил характеристики до вісі абсцис (*жорсткість* зовнішньої характеристики) оцінюється номінальною зміною  $\Delta U_{ном}$ :

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} 100 [\%]. \quad (1.40)$$

Як правило, для генераторів незалежного збудження  $\Delta U_{ном} = 5 \div 10 \%$ .

**Регулювальна характеристика.** Характеристика  $I_z = f(I)$  показує, як треба змінювати струм збудження, щоб, при зміні навантаження, напруга залишалась незмінною.

Збудивши генератор струмом  $I_{зоном}$  при ХХ до значення напруги  $U_{ном}$ , навантажують генератор і одночасно збільшують струм збудження, підтримують напругу незмінною (рис. 1.13).



Генератори незалежного збудження мають задовільні характеристики, недоліком же цих генераторів є необхідність мати стороннє джерело живлення.

Рисунок 1.13 – Регулювальна характеристика генератора незалежного збудження

**Генератор паралельного збудження.** Указаного вище недоліку позбавлені генератори з самозбудженням, одним з яких є генератор паралельного збудження, його схема зображена на (рис. 1.14, а).

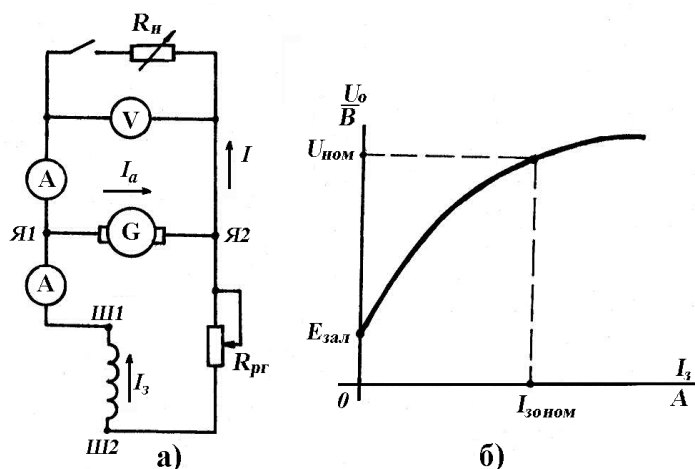


Рисунок 1.14 – Принципова схема (а) та характеристика НХ (б) генератора паралельного збудження

Принцип самозбудження генератора з самозбудженням оснований на тому, що магнітна система машини, будучи намагніченою, зберігає довгий час незначний залишковий магнітний потік  $\Phi_{зал} \approx 2 \div 3 \%$  від  $\Phi_{ном}$ . При обертанні якоря,  $\Phi_{зал}$  індукє в його обмотці ЕРС  $E_{зал}$ , під дією якої по обмотці збудження протікає незначний струм  $I_{зал}$ . Якщо магнітний потік, що створюється цим струмом, співпадає за напрямом з  $\Phi_{зал}$ , то

ЕРС якоря буде зростати, відповідно, буде зростати і струм збудження. Цей процес буде протікати доти, доки магнітна система не насититься. Процес самозбудження не буде мати місця, якщо опір кола збудження буде більшим ніж критичний, при якому збудження неможливе, а частота обертання меншою, ніж критична. Характеристика ХХ такого генератора представлена на (рис. 1.14, б). При струмі збудження рівному нулю, напруга дорівнює  $E_{зал}$  – ЕРС, що створюється залишковим потоком.

Зовнішня характеристика такого генератора м'якша від зовнішньої характеристики генератора незалежного збудження. Це зумовлено тим, що зниження напруги на затискачах генератора від падіння напруги в колі якоря та розмагнічувальної дії реакції якоря, приводить до зниження струму збудження, а отже, і ЕРС, що створюється в обмотці якоря (рис. 1.15, б).

Падіння напруги в генераторі паралельного збудження, доки машина насичена, відносно незначне, до навантаження  $I_{кр}$ . Далі машина переходить в ненасичений стан і напруга різко падає до нуля. Струм к.з.  $I_k$  буде незначним, зумовлений ЕРС  $E_{за}$ .

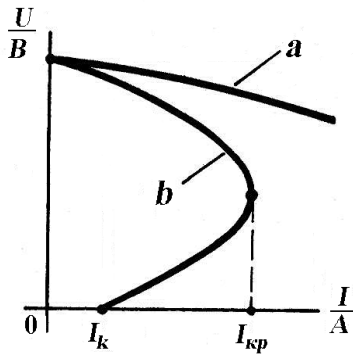


Рисунок 1.15 – Зовнішні характеристики генератора незалежного (а) та паралельного (б) збудження

Генератори паралельного збудження широко використовують в установках постійного струму, так як відсутність збуджувача вигідно відрізняють їх від генераторів незалежного збудження. Номінальне падіння напруги такого генератора складає  $10 \div 30 \%$ . **Генератор змішаного збудження** (рис. 1.16, а) має паралельну та послідовну обмотки збудження. Потік збудження створюється, в основному, паралельною обмоткою. Послідовна обмотка, як правило, умикається так, щоб м.р.с. обмоток складались, що забезпечує жорстку зовнішню характеристику генератора.

В режимі ХХ генератор має лише паралельне збудження,  $I = 0$ . При появі навантаження

потік послідовної обмотки збудження компенсує падіння напруги в якорі та розмагнічувальну дію реакції якоря і зовнішня характеристика змінюється по кривій 2 (рис. 1.16, б). При збільшенні числа витків послідовної обмотки можна отримати незмінну напругу на кінцях лінії, (компенсується падіння напруги в лінії) крива 1 (рис. 1.16, б).

Якщо обмотки генератора увімкнути *на зустріч*, то зовнішня характеристика стане досить м'якою, крива 3, що дає змогу використати такий генератор в електрозварювальних пристроях постійного струму.

**Генератори змішаного збудження з погодженим увімкненням обмоток** застосовують для живлення силового навантаження у випадках, коли необхідно мати незмінну напругу в лінії.

**Обмотка збудження генератора послідовного збудження** увімкнена послідовно з обмоткою якоря і навантаженням, тому напруга такого генератора різко змінюється зі зміною навантаження. На практиці такі генератори, як джерело постійного струму, не використовують, тому що до генераторів завжди ставлять вимогу підтримки незмінності напруги, чого не може забезпечити генератор послідовного збудження.

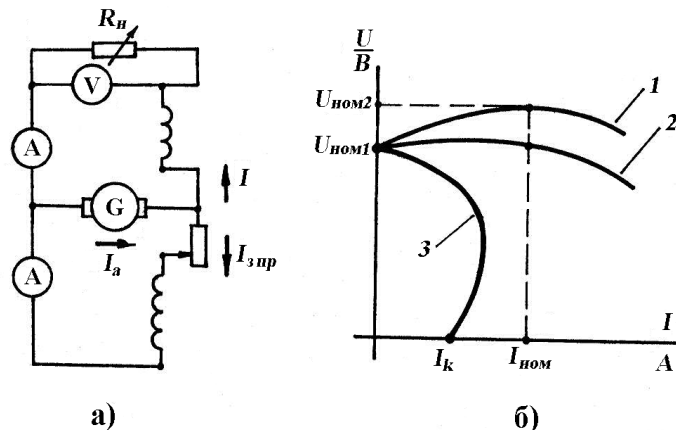


Рисунок 1.16 – Принципова схема (а) та зовнішні характеристики генератора змішаного збудження

## 1.7 Рівняння двигунів постійного струму

Для двигунів, як і для генераторів, постійного струму складають рівняння струмів, напруг, моментів та балансу потужностей.

Рівняння струмів, згідно з першим законом Кірхгофа, складають для двигунів паралельного та змішаного збудження. Двигун з послідовним збудженням має однакові струми в обмотках якоря і збудження:

$$I = I_a = I_z, \quad (1.41)$$

де  $I$  – струм навантаження, тобто, струм, що споживається з мережі;

$I_a$ ;  $I_z$  – струми обмоток якоря та збудження відповідно.

Рівняння струмів двигунів паралельного і змішаного збудження аналогічні:

$$I = I_a + I_z, \quad (1.42)$$

та

$$I = I_a + I_{z\text{ пр}}, \quad (1.43)$$

де  $I_{z\text{ пр}}$  – струм збудження паралельної обмотки збудження.

Як відомо, при обертанні якоря в його обмотці буде створюватись ЕРС  $E_a$ . Легко переконатись, що направлена вона назустріч струму якоря  $I_a$ , тому її ще називають *проти електрорушійна сила (проти ЕРС)*. Отже, за другим законом Кірхгофа для контуру «мережа – обмотка якоря» маємо:

$$U - E_a = I_a R_a, \quad (1.44)$$

де  $U$  – напруга мережі, прикладена до обмотки якоря,  $R_a$  – як і у генератора, електричний опір усіх послідовно увімкнених в коло якоря елементів, включаючи опір контакту «щітка – колектор».

Вираз (1.44) представляють, як правило, у вигляді

$$U = E_a + I_a R_a, \quad (1.45)$$

який і є рівнянням напруги двигуна, незалежно від способу його збудження.

Помноживши праву та ліву частини рівняння напруг на струм якоря  $I_a$ , отримаємо

$$UI_a = E_a I_a + I_a^2 R_a, \quad (1.46)$$

де  $UI_a$  – потужність, що підводиться до обмотки якоря з мережі;  $E_a I_a$  – електромагнітна потужність, що чисельно рівна сумарній механічній потужності, яка створюється в двигуні  $E_a I_a = M_{em} \omega$ ;  $I_a^2 R_a$  – електричні втрати на елементах, увімкнених в коло якоря, в тому числі, і втрати в контакті «щітка – колектор».

Електромагнітний момент  $M_{em}$ , що створюється в двигуні, на відміну від аналогічного моменту в генераторі, є обертовим – саме він обертає не лише ротор двигуна, а і те механічне навантаження, що з'єднане з валом ротора. Тому рівняння моментів для режиму двигуна, при  $\omega = const$ , буде мати вигляд:

$$M_{em} = M_2 + M_o, \quad (1.47)$$

де  $M_2$  – момент механічного навантаження на валу,  $M_o$  – момент холостого ходу.

Якщо рівняння моментів (1.47) помножити на частоту обертання (враховуючи, що  $\omega = const$ ), то отримаємо:

$$P_{em} = P_2 + P_o, \quad (1.48)$$

де  $P_2$  – механічна потужність на валу;  $P_o$  – як і у генератора, втрати ХХ згідно (1.38) рівні сумі механічних  $P_{mex}$  та магнітних  $P_{mag}$  втрат. Підставивши (1.48) в (1.46), отримаємо

$$UI_a = P_2 + I^2 R_a + P_{mex} + P_{mag} \quad (1.49)$$

Це рівняння і є рівнянням балансу потужностей.

На основі рівняння балансу потужностей будують *енергетичну діаграму* двигуна постійного струму, яка показує, як відбувається процес перетворення електричної потужності в механічну та які при цьому мають місце втрати (рис. 1.17).

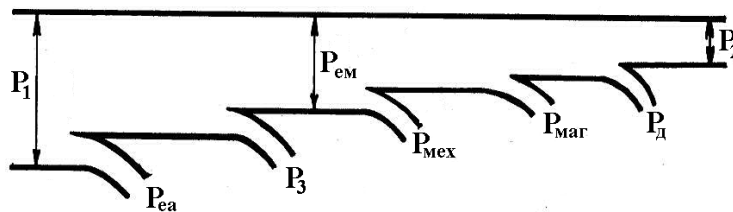


Рисунок 1.17 – Енергетична діаграма двигуна постійного струму

У відповідності з (1.8) кутову частоту обертання двигуна можна виразити як:

$$\frac{E_a}{k\Phi} \omega = , \quad (1.50)$$

або враховуючи (1.45):

$$\omega = \frac{U - I_a R_a}{k\Phi} \quad (1.51)$$

## 1.8 Характеристики двигунів постійного струму паралельного, послідовного та змішаного збудження

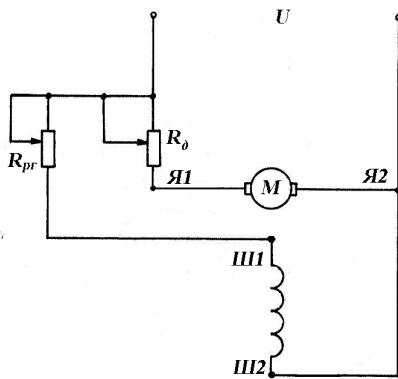


Рисунок 1.18 – Принципова схема двигуна паралельного збудження

Принципова схема двигуна **паралельного збудження** представлена на (рис. 1.18).

В коло обмотки якоря умикають додатковий опір  $R_\delta$ , який обмежує пусковий струм при реостатному пуску і дає можливість змінювати частоту обертання двигуна при заданому навантаженні. Регулювальний опір в колі обмотки збудження дозволяє знизити струм збудження, а отже, і магнітний потік.

Для отримання аналітичного виразу швидкісної характеристики  $\omega = f(I_a)$  перетворимо вираз (1.51):

$$\omega = \frac{U - I_a R_a}{k\Phi} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_a}{k\Phi} I_a = \omega_0 - \Delta\omega \quad (1.52)$$

де  $\omega_0$  – кутова частота обертання ідеального холостого ходу;

$\Delta\omega$  – зміна кутової частоти обертання, викликана зміною навантаження на валу двигуна. З виразу (1.52) легко отримати аналітичний вираз механічної характеристики, підставивши в нього із (1.13) значення струму якоря

$$I_a = \frac{M_{em}}{k\Phi} \quad (1.53)$$

отримаємо

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R_a}{k^2\Phi^2} M_{em} = \omega_0 - \Delta\omega. \quad (1.54)$$

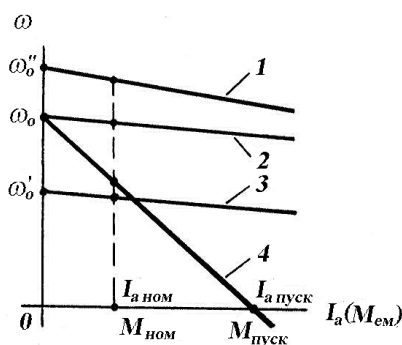


Рисунок 1.19 – Швидкісні (механічні) характеристики двигуна паралельного збудження

Якщо знехтувати реакцією якоря, то, так як  $I_z = \text{const}$ , можна прийняти  $\Phi = \text{const}$ . Тоді швидкісні (механічні) характеристики уявляють прямі лінії, нахилені до вісі абсцис (рис. 1.19).

Кут нахилу будь-якої з цих характеристик визначається співвідношенням між опором кола якоря та магнітним потоком. Найменший нахил мають природна 2 та штучна на знижений напрузі кола якоря 3 (рис. 1.19) характеристики, магнітний потік яких максимальний, а опір кола якоря мінімальний.

Штучна реостатна характеристика 4 має значний нахил, зумовлений увімкненням додаткового опору в коло якоря, а штучна при ослабленому полі характеристика 1 – зменшенням магнітного потоку.

Робочі характеристики двигуна паралельного збудження представлені на (рис. 1.20).

Залежність частоти обертання від корисної потужності на валу, до деякої міри, можна розглядати і як швидкісну характеристику. Але, на відміну від природної характеристики 2 (рис. 1.19),  $n = f(P_2)$  є кривою, враховуючи розмагнічувальну дію реакції якоря, якщо ж ця дія суттєва, то крива  $n = f(P_2)$  взагалі може зростати (пунктирна лінія на рис. 1.20).

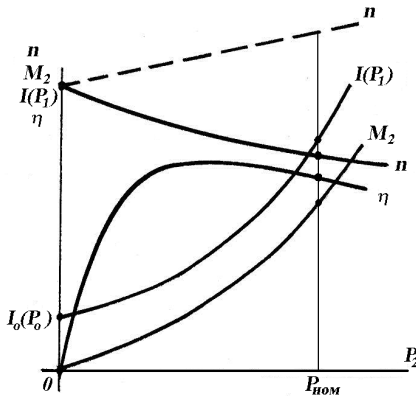


Рисунок 1.20 – Робочі характеристики двигуна паралельного збудження

Слід зазначити, що зростання частоти обертання при зростанні навантаження небажане, тому що супроводжується нестійкою роботою двигуна, а при значному навантаженні, двигун взагалі може піти в рознос, коли частота обертання зростає до нескінченності. Щоб цього не сталося у деяких двигунів виконують стабілізуючу обмотку збудження. Її вмикають послідовно обмотці якоря так, щоб потоки обох обмоток співпадали. Це дозволяє підтримати магнітну систему в насиченому стані і мати незначну зміну частоти обертання в межах  $\Delta n_{ном} = 3-8\%$ .

Якби частота обертання залишалась незмінною ( $n = const$ ), то корисний момент на валу був би пропорційним корисній потужності, тому що

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n} . \quad (1.55)$$

Зниження ж частоти обертання призводить до викривлення, так званої, моментної характеристики двигуна  $M_{ем} = f(P_2)$ , а отже, і характеристики  $M_2 = f(P_2)$ , враховуючи (1.47).

Слід зазначити, що двигуни паралельного збудження мають дуже широкий діапазон регулювання частоти обертання від нуля до  $\omega_{макс}$ , де значення  $\omega_{макс}$  – обмежене лише умовами задовільної комутації та механічною міцністю.

Застосовують такі двигуни скрізь, де необхідно плавно в значних межах регулювати частоту обертання і відсутні важкі умови пуску та роботи, наприклад, в допоміжних пристроях металорізучих верстатів, на електростанціях для приводу механізмів, що потребують широкого та плавного регулювання частоти обертання та ін.

Схема двигуна послідовного збудження зображена на (рис. 1.21).



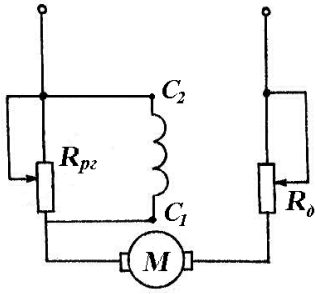


Рисунок 1.21 – Принципова схема двигуна послідовного збудження

Як і у схемі двигуна паралельного збудження, тут використовуються додатковий  $R_d$  та регулювальний  $R_{pz}$  опори, останній, на відміну від схеми двигуна паралельного збудження, вмикається паралельно обмотці збудження.

Послідовне з'єднання обмоток збудження та якоря суттєво впливає на характеристики цього двигуна, хоча рівняння швидкісних характеристик мають такий же вигляд, що і для двигунів паралельного збудження.

Так як магнітний потік такого двигуна є функція струму якоря ( $I_a = I_z$ ), то залежність  $\Phi = f(I_a)$  називається магнітною характеристикою, (рис. 1.22). Якщо для спрощення вважати, нехтуючи насиченням магнітної системи, що залежність між потоком і струмом якоря лінійна (пунктирна лінія на рис. 1.22), то:

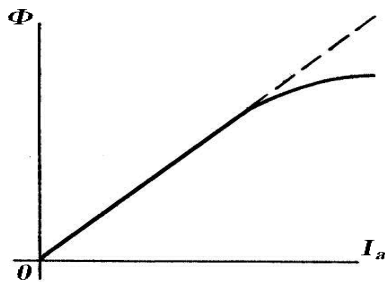


Рисунок 1.22 – Магнітна характеристика двигуна послідовного збудження

$$\Phi = k_\phi I_a, \quad (1.56)$$

де  $k_\phi$  – коефіцієнт пропорційності між потоком і струмом, то, враховуючи (1.13) маємо

$$M_{em} = k k_\phi I_a^2. \quad (1.57)$$

Отже момент, що його розвиває двигун послідовного збудження пропорційний квадрату струму якоря, тоді як у двигуна паралельного збудження ця залежність

пряма.

**Швидкісні (механічні) характеристики.** Із (1.51), враховуючи (1.55), маємо:

$$\omega = \frac{U - I_a R_a}{k k_\phi I_a}. \quad (1.58)$$

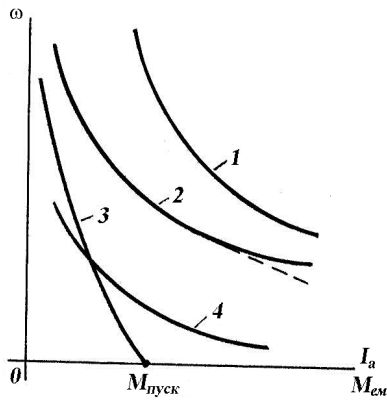


Рисунок 1.23 – Швидкісні (механічні) характеристики двигуна

Оскільки падіння напруги в колі якоря  $I_a R_a$  незначне і при  $I_a = I_{аном}$  складає 2–4%  $U_{ном}$ , то зниження числівника (1.58), при зміні струму якоря, досить незначне, тому природна швидкісна (механічна) характеристика  $\omega = f(I_a)$  ( $\omega = f(M_{ем})$ ) носить гіперболічний характер, (крива 2 рис. 1.23).

Особливістю цієї характеристики є її значна крутизна при малих струмах навантаження. Збільшення частоти обертання при малих навантаженнях зумовлене відповідним зниженням

магнітного потоку. Дійсна характеристика  $\omega = F(I_a)$  при струмах, що перевищують (0,7–0,8)  $I_{аном}$ , буде відхилятися від гіперболічної залежності (штрихова лінія кривої 2, рис. 1.23). Пов'язано це з тим, що при значних струмах, у зв'язку з насиченням магнітного кола, магнітний потік, із зростанням струму, зростає на менше значення, ніж витікає з (1.56), через що кутова частота обертання стає дещо більшою. Крім цього розмагнічувальна дія реакції якоря також знижує магнітний потік, що ще збільшує частоту обертання.

Штучна реостатна характеристика цього двигуна (крива 3 рис. 1.23) має ще більш м'який характер і дозволяє здійснити пуск при, відносно, незначному пусковому моменті  $M_{пуск}$ . Досягається така характеристика шляхом увімкнення додаткового опору в коло двигуна.

Штучна характеристика на зниженій напрузі (крива 4 рис. 1.23) при незначних навантаженнях має більш крутий нахил, а при навантаженнях близьких до номінальних, практично, повторює, при нижчій частоті обертання, природну характеристику.

Штучна при ослабленому полі характеристика двигуна (крива 1 рис. 1.23) може бути отримана шляхом шунтування обмотки збудження регульовальним опором (рис. 1.21).

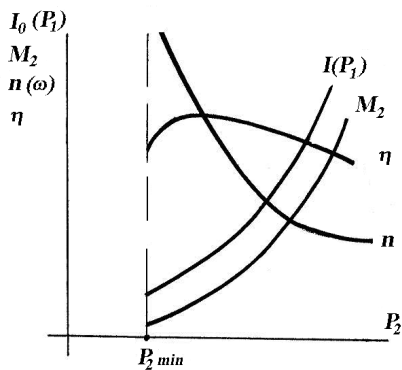


Рисунок 1.24 – Робочі характеристики двигуна послідовного збудження

**Робочі характеристики.** Ці характеристики зображені на (рис. 1.24).

Побудова робочих характеристик можлива лише з точки  $P_{2\min}$ . Двигун послідовного збудження не може працювати в режимі холостого ходу через ймовірність розносу.  $P_{2\min}$ , як правило, складе 25-30% від  $P_{ном.}$ . Щоб запобігти розносу вали двигунів послідовного збудження жорстко з'єднуються з робочим механізмом муфтою чи зубчатою передачею. Застосування ремінних з'єднань не допускається, так як при обриві, чи скиданні ременю, може відбутися рознос.

Враховуючи особливості двигуна послідовного збудження, а саме, квадратичну залежність електромагнітного моменту від струму якоря (1.57), такі двигуни використовують там, де існують важкі умови пуску і роботи та необхідно регулювати частоту обертання в широких межах, наприклад, електротранспорт, електропривід прокатних станів та ін. Пояснюється це тим, що при значних змінах навантаження, що супроводжуються поштовхами моменту, струм і потужність, що споживаються з мережі, будуть змінюватися у меншій мірі, ніж у двигунів паралельного збудження. Так для двигуна послідовного збудження струм якоря, відповідно до (1.57)

$$\frac{\overline{M_{em}}}{I_a \overline{k_\phi k_\psi}} \equiv \sqrt{M_{em}}, \quad (1.59)$$

тоді як у двигунів паралельного збудження при  $\Phi = const$ , згідно (1.53)

$$\frac{M_{em}}{k_\phi} I_a = M_{em} \quad (1.60)$$

Враховуючи незмінність напруги мережі, і потужність що споживається з мережі має  $P_1 = UI$ .

Схема двигуна **змішаного збудження** зображена на (рис. 1.25).

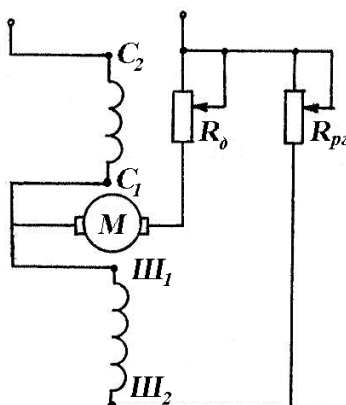


Рисунок 1.25 – Принципова схема двигуна змішаного збудження

Звичайно в таких двигунах послідовна і паралельна обмотки збудження умикаються так, щоб магнітні потоки, які вони створюють, співпадали. Характеристики двигунів змішаного збудження займають проміжні положення між відповідними характеристиками двигунів паралельного та послідовного збудження.

Якщо послідовна обмотка збудження слабка, то характеристики наближаються до характеристик двигуна паралельного збудження, якщо сильна – до характеристик послідовного.

На рисунку 1.26 представлені для порівняння природні механічні характеристики:

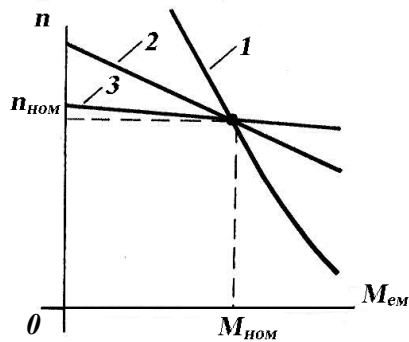


Рисунок 1.26 – Механічні характеристики двигунів постійного струму

- 1 – двигун послідовного збудження;
- 2 – двигун змішаного збудження;
- 3 – двигун паралельного збудження.

Штучні та робочі характеристики такого двигуна займуть також відповідні проміжні положення.

Двигуни змішаного збудження використовують, в залежності від магніторушійної сили послідовної обмотки збудження, або замість двигунів паралельного, або замість послідовного збудження, а також, там необхідні значні пускові моменти, швидке прискорення при розгоні, стійка робота, що допускає лише незначне зниження частоти обертання при збільшенні навантаження на валу (прокатні стани, вантажні підіймальники, насоси, компресори).

### 1.9 Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму

Кутова частота обертання пропорційна напрузі і зворотно пропорційна магнітному потоку збудження. Фізично це можна пояснити тим, що підвищення напруги  $U$  або зниження потоку викличе збільшення різниці  $(U - E_a)$ , що в свою чергу, приводить до зростання струму якоря  $I_a$ . Струм, при зростанні, підвищує електромагнітний момент  $M_{ем}$  (1.13), а так як момент навантаження залишається незмінним, то зростає частота обертання.

Вираз (1.51) вказує на можливі шляхи регулювання кутової частоти обертання:

- зміною напруги  $U$ , яку підводять до двигуна; при цьому частота обертання може бути зміненою від нуля до  $1,15 \omega_{ном}$  (підвищення напруги більше ніж  $10 \div 15 \%$  небажане через підвищення напруги між колекторними пластинами і, як наслідок, погіршення комутації);
- введення додаткових опорів у коло якоря, що дає можливість змінювати кутову частоту обертання від номінальної до нуля;
- зміною магнітного потоку, в насиченій машині потік можна лише знизити і тим самим збільшити частоту обертання (це досягається зміною струму обмотки збудження) від номінальної частоти обертання до  $(1,5 \div 1,7) \omega_{ном}$ .

## 2 ПРИНЦИП ДІЇ ВЕНТИЛЬНИЙ РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ

### 2.1 Пристрій і принцип дії вентильних реактивних двигунів

Електродвигун перетворює електричну енергію в механічну. Електромеханічна система (рис. 2.1) здійснює таке ж перетворення енергії, тому її можна розглядати як електродвигун (вентильний реактивний двигун).



Рисунок 2.1 – Електромеханічна система, що перетворює електричну енергію в механічну

На одному валу з електромеханічним перетворювачем (ЕМП) (рис. 2.1) закріплений датчик положення ротора ДПР. Кожна фаза ЕМП створює крутний момент тільки в певному діапазоні кутів повороту ротора. У цьому діапазоні кутів ДПР виробляє сигнал, який надходить в мікропроцесор і далі, через пристрій, що погодить, в електронний комутатор, який живиться від джерела постійного струму. При надходженні сигналу в електронний комутатор відповідна фаза ЕМП підключається до джерела постійного струму. При виході за межі робочого діапазону кутів повороту ротора подача сигналу ДПР припиняється і відповідна фаза закорочується сама на себе, а потім підключається до напруги зворотної полярності. Таке підключення призводить до швидкого спадання струму в фазі до нуля. Завдання величин кутів

включення, закорочування і противключення здійснюється з пульта управління.

Електромеханічний перетворювач вентильного реактивного двигуна (ВРД) складається з багатозубцевого статора з обмотками на зубцях і багатозубцевого ротора (рис. 2.2). Групи котушок, з'єднаних між собою, утворюють фазу ЕМП. У наведеному прикладі з'єднані між собою котушки на діаметрально протилежних зубцях і, відповідно, початку фаз позначені А, В, С, D, а кінці фаз – а, в, с, d.

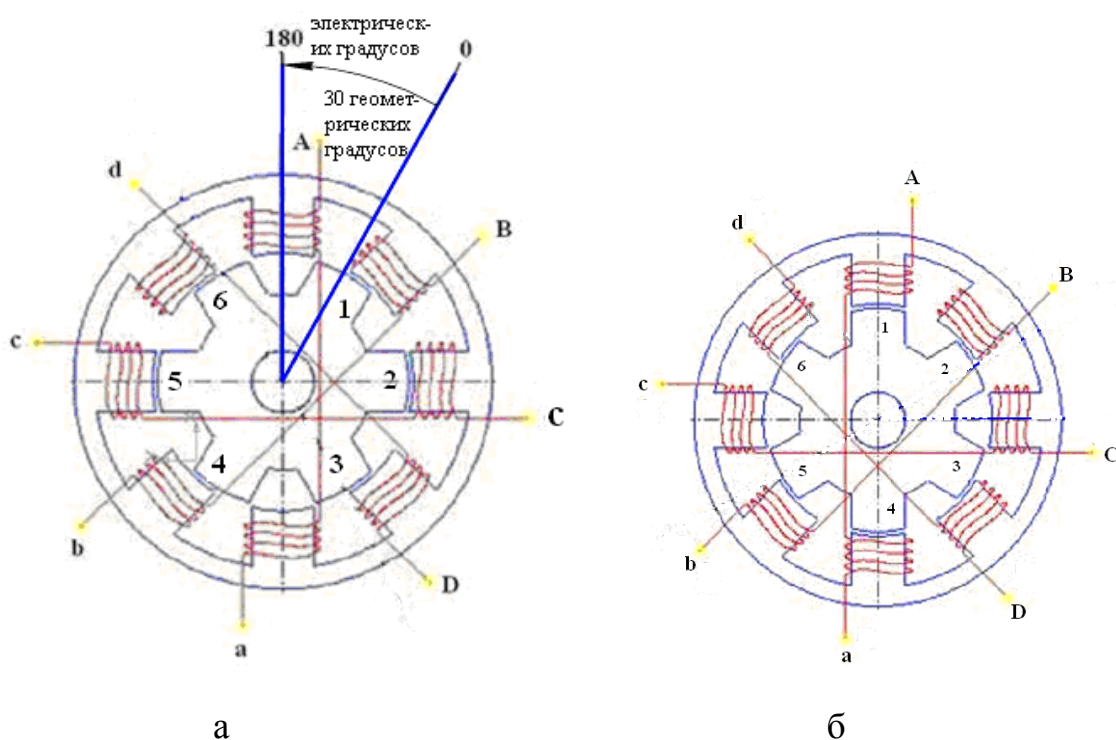


Рисунок 2.2 – Активна частина чотирижильного ВРД з відношенням чисел пазів 8/6:

- а – в неузгоджені положенні щодо зубців фази А;
- б – в узгодженому положенні щодо зубців фази А

Положення зубця ротора, в якому його вісь збігається з віссю зубця статора, називається узгодженим, а положення, в якому вісь зубця статора проходить по осі між двома сусідніми зубцями ротора – неузгоджені. Так для фази А має місце неузгодженість положення (рис. 2.2, а), а для фази С – узгоджене. Вісь, що проходить через середину зубця ротора, що знаходиться в неузгоджені положенні, приймається за вісь відліку кута повороту ротора.

$$\zeta = 0 - 180 \text{ эл. град. } \zeta = 180 \text{ эл. град. } \zeta > 180 \text{ эл. град. } \zeta = 180 \text{ эл.град.}$$

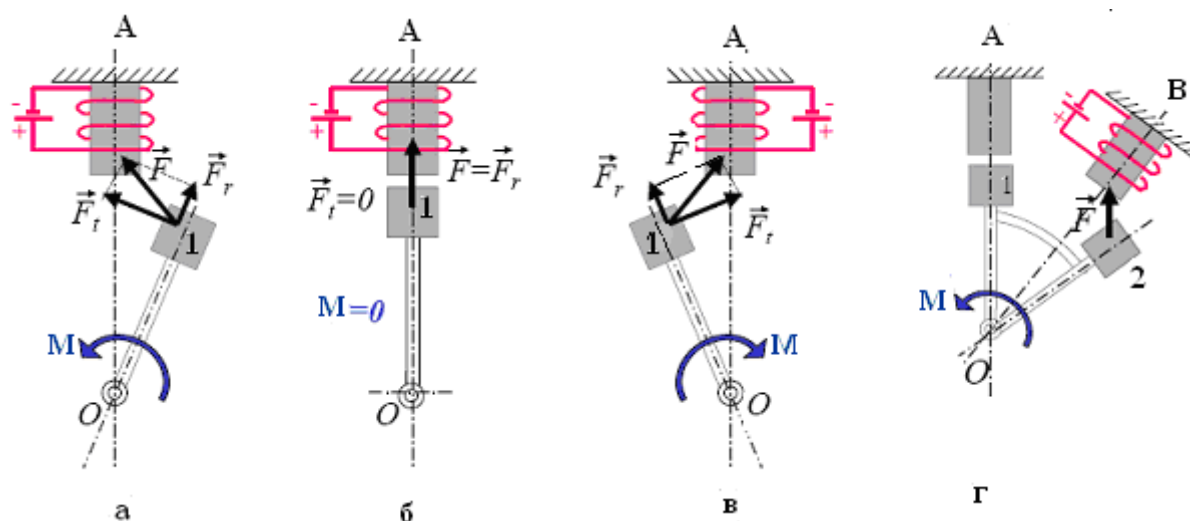


Рисунок 2.3 – Сили і моменти, що діють на зубець 1 (а, б, в) і зубець 2 (г):

- а) при значенні кута повороту ротора від  $\zeta = 0$  електричних градусів, відповідному неузгоджені положення, до  $\zeta = 180$  електричним градусам, відповідному узгоджені положення;
- б) в узгодженому положенні  $\zeta = 180$ , при протіканні струму в обмотці фази А;
- в) при  $\zeta > 180$  електричних градусів;
- г) при  $\zeta = 180$  електричних градусів (узгоджене положення), без струму в обмотці фази А і дії сили  $F$  на зубець (2).

Значення кута повороту ротора в цьому положенні дорівнює нулю. При повороті ротора на 30 геометричних градусів проти годинникової стрілки він виявиться в узгодженому положенні, в якому кут його повороту дорівнює 180 електричним градусам:

$$\zeta = \zeta_A \cdot N_p, \quad (2.1)$$

- де  $\zeta$  – кут повороту ротора в електричних градусах;  
 $\zeta_r$  – кут повороту ротора в геометричних градусах;  
 $N_p$  – число зубців ротора.

При подачі на фазу А постійної напруги протікає по обмотці ток обумовлює виникнення магніторухливної сили і магнітного потоку. За рахунок магнітного тяжіння в неузгоджені положенні (рис. 2.2, а) на зубець 1 діє сила  $F$  (рис. 2.3, а). Ця сила може бути розкладена на дві складові: радіальну  $F_r$  і тангенціальну  $F_t$ . Тангенціальна складова зумовлює появу моменту  $M$ . Якщо зубець фази А і зубець ротора не відокремлені (рис. 2.3, а), а зубець фази А знаходиться посередині між 1 і 6 зубцями ротора (рис. 2.2, а) (неузгодженість положення), то на зубець 6 діє така ж сила  $F$ , як і на зубець 1 (рис. 2.3, в), тангенціальна складова якої протилежно направленої тангенціальній складовій, яка додається до зубця 1. Отже, результуюча тангенціальна складова дорівнює

нулю і, відповідно, момент від дії цих сил також дорівнює нулю. Але момент, що діє не на зубець, а на ротор не дорівнює нулю. До включення фази А підключеної була фаза D (рис. 2.2, а). Між зубцем ротора 6 і зубцем фази D діє сила магнітного тяжіння, яка обумовить зрушення ротора проти годинникової стрілки. У міру повороту ротора сила магнітного тяжіння зубця 6 до зубця фази А буде зменшуватися, а зубця 1 до зубця фази А – збільшуватися, що зумовить зростання моменту, що діє на ротор. Коли при повороті ротора вісь зубця 1 суміститься з віссю зубця фази А – узгоджене положення (рис. 2.2 б; 2.3 б), тангенціальна складова сили, що діє на зубець 1, буде дорівнює нулю, а радіальна складова буде максимальною, якщо по обмотці фази А буде протікати струм. В узгодженому положенні, при нульовому струмі фази, прийме нульове значення сила F. Якщо ж струм в фазі А не дорівнює нулю, то при значенні кута повороту ротора більшому 180 електричних градусів (рис. 2.3, в) виникає момент, викликаний тангенціальною складовою сили F (-Ft), протилежно направленим по відношенню до обертання ротора (гальмівний момент). Нульове значення струму в узгодженому положенні може бути досягнуто тільки тоді, коли противовключенням обмотки відбувається при величині кута повороту ротора:

$$\gamma_{off} = \begin{cases} 180 - (\alpha_k - \gamma_{on}) & \text{якщо перед противовключением обмотка} \\ & \text{закорочується;} \\ 90 + \frac{\gamma_{on}}{2} & \end{cases} \quad (2.2),$$

якщо закорочування не проводиться, де  $\gamma_{on}$  – кут повороту ротора, при якому обмотка фази підключається до джерела живлення (кут включення обмотки).

Коли зубець 1 і зубець фази А знаходяться в узгодженому положенні (рис. 2.2, б і 2.3, г) і струм фази А буде дорівнює нулю і, відповідно, на зубець 1 цієї статті не буде впливати сила, в неузгоджені положенні щодо зубця фази В виявиться зубець 2, на який буде діяти сила F. Тангенціальна складова цієї сили обумовлює наявність моменту обертання ротора. Так при почерговому включенні і відключенні фаз при відповідних положеннях зубців ротора, здійснюється його обертання.

Характеристики вентильних реактивних двигунів залежать від величин кутів повороту ротора, при яких відбуваються включення, закорочування і противовключенням обмотки фази (від кутів комутації).

У ВРД є датчик кута повороту ротора. При конструктивному виконанні датчика (рис. 2.4), на виході датчика з'являється сигнал прямокутної форми, коли кут повороту ротора дорівнює куту підключення обмотки фази до джерела живлення. Тривалість сигналу дорівнює часу, за яке з моменту включення ротор повернеться на кут, рівний різниці кута відключення, і кута включення.



У цей момент відбувається відключення обмотки фази від джерела живлення. Вибір типу і конструктивного виконання датчика кута повороту ротора залежить від режиму зміни частоти обертання двигуна. Для незмінної частоти обертання конструкція датчика кутів комутації складається з двох елементів:

1) диск з рівномірно розподіленими по колу, дугоподібними виступами (шторками) насаджений на вал (рис. 2.4, 2.5), встановлений з зовнішньої (рис. 1.4) або з внутрішньої – (рис. 2.5) сторони щита;

2) датчик наявності (відсутності) шторки в його робочій зоні (рис. 2.4, 2.6).

Як датчики (2) застосовуються індукційні датчики, датчики Холла і оптичні датчики.

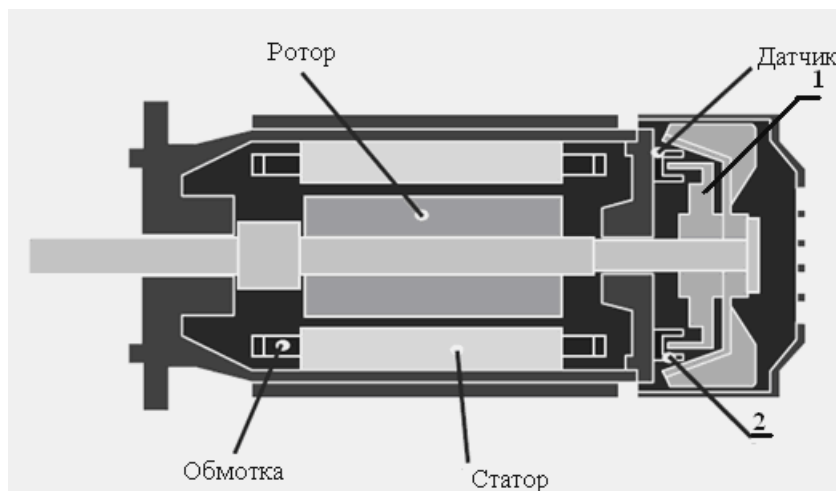


Рисунок 2.4 – Вентильний реактивний двигун з датчиком кутів комутації

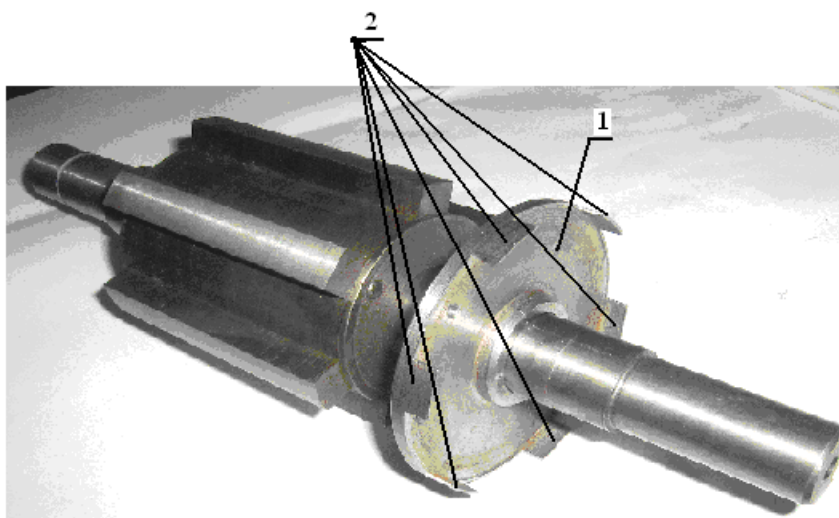


Рисунок 2.5 – Ротор з диском (1) з рівномірно розподіленими по колу дугоподібними виступами 2 (шторками), насадженим на вал

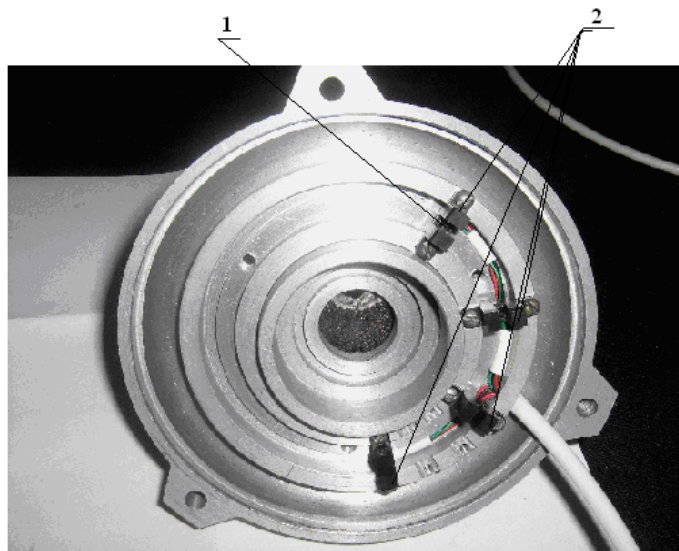


Рисунок 2.6 – Закріплені з внутрішньої сторони підшипникового щита датчики наявності (відсутності) шторки (2) в їх робочих зонах (1)

У той момент, коли край шторки входить в робочу зону датчика по що з'являється на його виході сигналу, що подається на мікропроцесор (рис. 2. 1), а потім через пристрій, що на електронний комутатор, здійснюється включення обмотки. Тривалість сигналу визначається часом перебування шторки в робочій зоні датчика. Чим більше центральний кут, відповідний дузі шторки, тим більше тривалість сигналу датчика. При виході шторки за межі робочої зони датчика сигнал зникає і комутатором обмотка відключається від джерела живлення. Виходячи з цього, величина центрального кута приймається рівною різниці кута відключення – і кута включення – чим забезпечується необхідна тривалість перебування обмотки у включеному стані. Кутове положення датчика на щиті двигуна (рис. 2.6) встановлюється таким чином, щоб в момент, коли кут повороту ротора буде дорівнює куту, одночасно з'явився сигнал датчика і по цьому сигналу комутатор підключив обмотку до джерела живлення.

Комутація, в основі якої лежить поява і зникнення сигналу датчика, в міру входу шторки в робочу зону датчика і виходу з неї, можлива при незмінних кутах комутації. Кути комутації повинні бути незмінними, якщо незмінна частота обертання. При зміні частоти обертання слід змінювати кути комутації.

Це може бути здійснено наступним чином:

- за допомогою мікропроцесора фіксується час між двома найближчими включеннями будь-якої фази за цей час, що дорівнює періоду  $T$  ротор повертається на 360 електричних градусів;
- з пульта управління (рис. 2.7) в мікропроцесор вводяться значення кутів комутації;

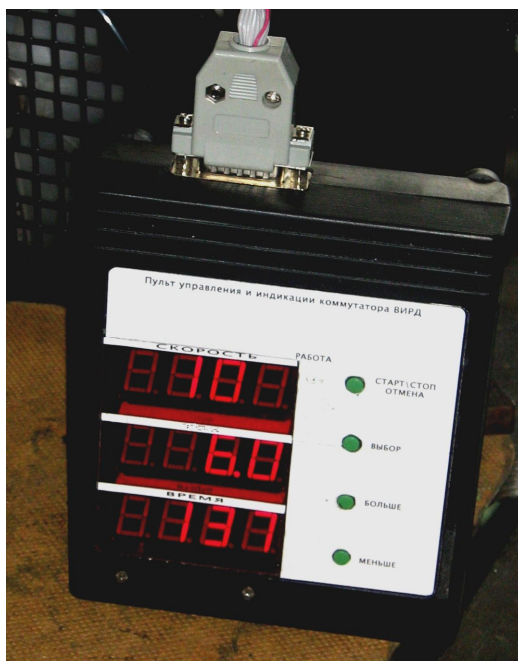


Рисунок 2.7 – Пульт управління ВРД

- мікропроцесор обчислює відповідні часи, базуючись на певному періоді  $T$  і заданих з пульта кутах комутації:

$$t_B = \frac{\gamma_{on} \cdot T}{2 \cdot \pi}, \quad (2.3)$$

$$t_{B_{\text{вык}}} = \frac{\gamma_{off} \cdot T}{2 \cdot \pi}, \quad (2.4)$$

$$t_k = \frac{\alpha_k \cdot T}{2 \cdot \pi}, \quad (2.5)$$

де  $\gamma_{on}$ ,  $\gamma_{off}$  и  $\alpha_k$  – кути включення, відключення і заколючування відповідно;

$t_B$ ,  $t_{B_{\text{вык}}}$  и  $t_k$  – моменти часу, в які мікропроцесором видається команда на виконання відповідної дії.

Зміна кутів комутації, таким чином, можливо на працюючому двигуні.

## 2.2 Характеристики вентильних реактивних двигунів

Електромагнітні та електромеханічні процеси в вентильному реактивному двигуні описуються рівняннями (2.6; 2.7):

$$U = ri_1 + \frac{d\Psi_1}{dt};$$

.....

$$U = ri_m + \frac{d\Psi_m}{dt}; \quad (2.6)$$

$$M_{\ddot{a}\ddot{a}} - \dot{I}_{\ddot{n}} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.7)$$

де  $U$  – напруга джерела живлення,  
 $i$  – струм обмотки;  
 $r$  – активний опір обмотки статора;  
 $\Psi$  – потокозцеплення;  
 $t$  – час;  
 $\dot{I}_{\ddot{a}\ddot{a}}$  – електромагнітний момент двигуна;  
 $M_c$  – момент опору;  
 $J$  – сумарний момент інерції двигуна і механізму;  
 $\omega$  – кутова частота обертання;  
 $\zeta$  – кут повороту ротора;  
 $m$  – число фаз двигуна.

$$M_{\ddot{a}\ddot{a}}(i, \zeta) = \sum_{k=1}^m \int \frac{\partial \Psi}{\partial \zeta_k} di \quad (2.8)$$

$$\text{де } \zeta_k = \zeta_1 - \frac{2\pi(k-1)}{m} - 2\pi \cdot E\left(\frac{\zeta_1}{2\pi} - \frac{k-1}{m}\right).$$

Вираз (2.3) базується на відомому співвідношенні  $M = \frac{\partial W}{\partial \zeta}$ , де  $W$  – енергія, зміна якої зумовлює виникнення крутного моменту. В даному випадку такою є коенергія, рівна площі між верхньою кривою (рис. 2.8) і віссю абсцис. При повороті ротора на кут  $\partial \zeta$  залежність  $\Psi(\zeta)$  відповідатиме нижня крива (рис. 2.8), а зміна коенергії дорівнюватиме площі заштрихованого ділянки, яка і представляється виразом (2.8).

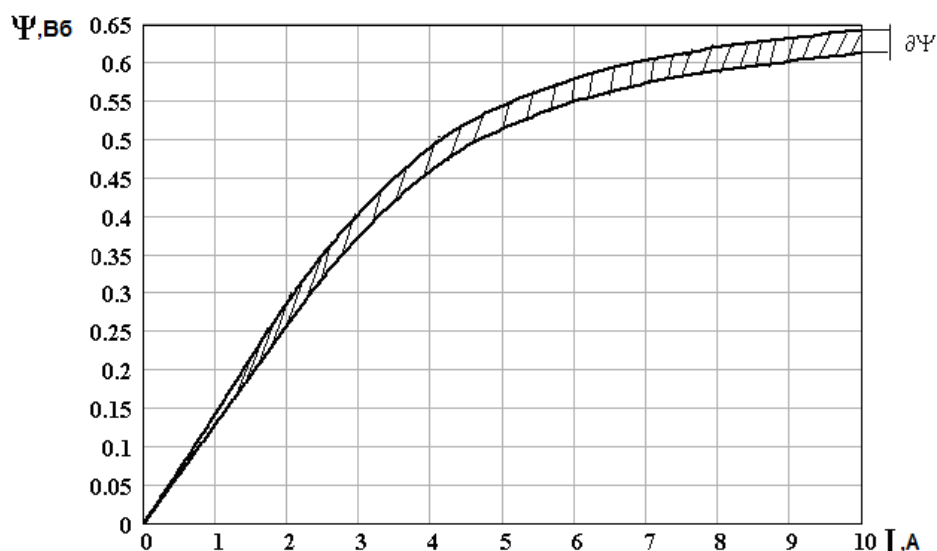


Рисунок 2.8 – Залежність потокозцеплення від струму для двох близьких значень кута повороту ротора

Ліва частина, рівнянь, що містить напруга, за цикл комутації приймає три значення:

$U$  – коли обмотка підключена до випрямляча, при цьому транзистори VT1 і VT2 відкриті (рис. 2.9, а). При цьому включення напруга на ємності.

$$U_c = U;$$

0 – коли обмотка закорочена сама на себе, при цьому транзистор VT1 закритий, а VT2 відкритий (рис. 2.9, б);

$-U$  – коли початок і кінець обмотки помінялися предметами щодо затискачів випрямляча (режим протиковлючення), при цьому обидва транзистора закриті (рис. 2.9, в).

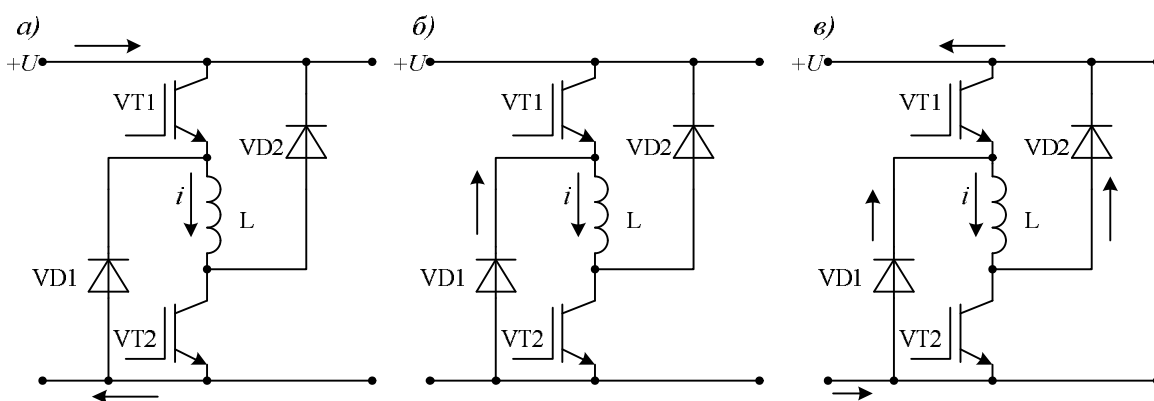


Рисунок 2.9 – Контури струмів при різному стані транзисторів

З рішення системи можуть бути отримані механічні характеристики (рис. 2.10).

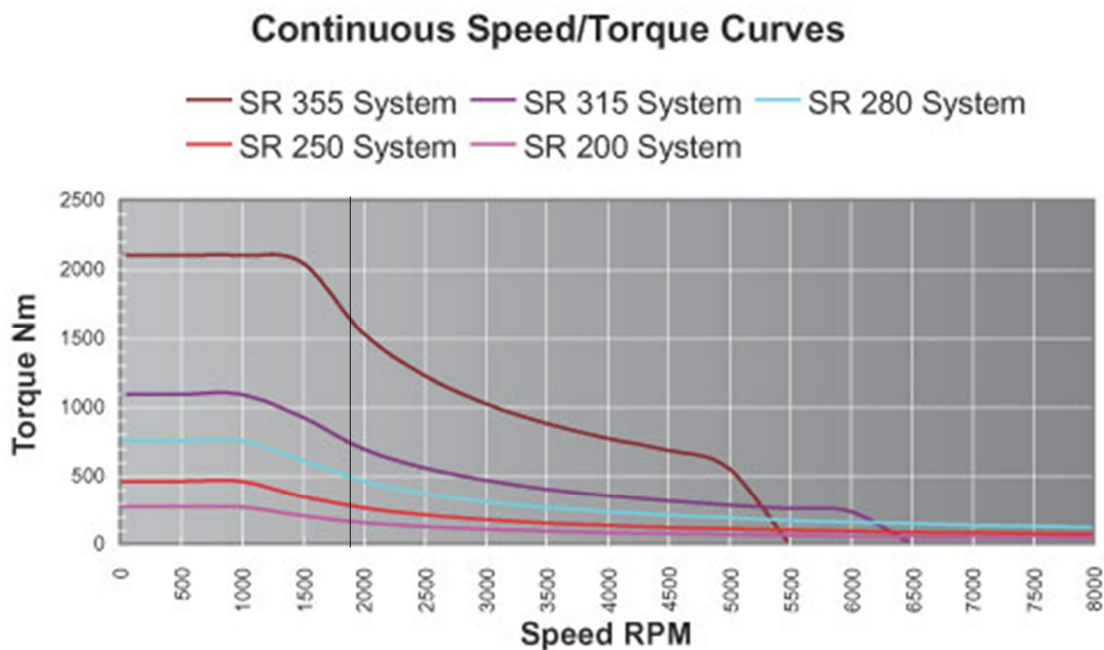


Рисунок 2.10 – Механічні характеристики ВРД SR фірми LeTourneau

Характер кривих струму змінюється в залежності від величини навантаження, частоти обертання, ступеня насичення муздрамтеатру і кутів комутації.

### 2.3 Вентильний електродвигун постійного струму

Двигуни постійного струму звичайного виконання з механічним комутатором – колектором, мають ряд дуже істотних недоліків, обумовлених наявністю щітково-колекторного вузла. Ці недоліки обмежують області їх застосування.

Останнім часом з'явилися і почали знаходити все більш широке застосування, особливо в схемах автоматики, від яких потребується висока надійність роботи у важких умовах експлуатації (вакуум, різко мінливі температури, тряска, вібрація і т.п.), безконтактні двигуни постійного струму не з механічним (щітка-колектор), а з напівпровідниковим комутатором. Ці двигуни, володіючи практично майже всіма позитивними властивостями звичайних двигунів постійного струму, позбавлені їх основного нестачі – не мають щітково-колекторного вузла.

Статор (якір) двигуна нічим не відрізняється від статора асинхронного двигуна. Ротор являє собою систему постійних магнітів з числом полюсів, що дорівнює кількості полюсів статора. На одному валу з ротором закріплена рухома частина датчика кута повороту ротора (рис. 2.12).

При підключенні фази А до джерела постійного струму рисунок 2.12, в момент, коли вісь магніту буде повернута на 90 електричних градусів щодо напрямлення магнітного потоку якоря від взаємодії струму якоря з магнітним потоком полюсів виникає крутний момент.

Під дією крутного моменту швидкість обертання ротора  $n$  буде зростати. При цьому буде зростати і величина противодійної напруги  $e$ . д. з.  $E$ , що наводиться в обмотці якоря потоком постійного магніту  $\Phi$ :

$$E = c_e n \Phi, \quad (2.9)$$

де  $c_e$  – постійна величина.

Напруга  $U$  в сталому режимі врівноважується  $e$ . д. з.  $E$  і падінням напруги на активному опорі обмотки якоря від струму  $I$ :

$$U = E + Ir = c_e n \Phi + Ir. \quad (2.10)$$

Швидкість обертання  $n$ , вираз якої легко отримати з (2.2),

$$n = (U - Ir) / c_e \Phi \quad (2.11)$$

ставиться тоді, коли момент  $M$ , що розвивається двигуном, буде дорівнює моменту опору  $M_c$ :

$$M = c_M I \Phi = M_c, \quad (2.12)$$

де  $c_M$  – постійна величина.

Комутатор так перемикає секції обмотки якоря, що струми в обмотці якоря під відповідними полюсами магніту завжди мають один і той же напрямок.

Механічний щітково-колекторний комутатор, як уже говорилося, елемент дуже ненадійний. У зверненої машини, де обмотка якоря нерухома, його легко замінити статичним напівпровідниковим комутатором (перемикачем), керованим деяким датчиком положення ротора, розташованим на валу двигуна.

На рисунку 2.11 представлена структурна схема вентильного двигуна постійного струму.

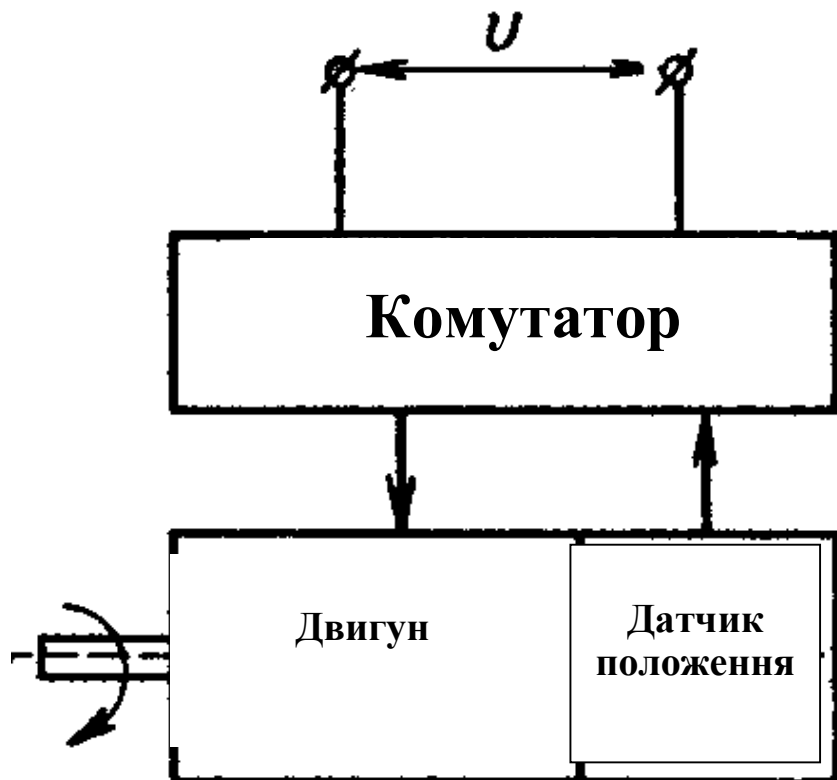


Рисунок 2.11 – Структурна схема вентильного двигуна

Статичний комутатор, отримуючи сигнали управління з датчика положення ротора, може забезпечити при обертанні ротора така ж зміна струмів в обмотці якоря, як і щітки з колектором.

Безконтактні двигуни постійного струму, як правило, складаються з трьох елементів:

- 1) безконтактного двигуна з  $m$ -фазної обмоткою на статорі і збудженим ротором у вигляді постійного магніту;
- 2) датчика положення ротора, виконаного в одному корпусі з двигуном, який виробляє сигнали управління, що визначають момент часу й послідовність комутації обмоток двигуна;
- 3) безконтактного комутатора, здійснює за сигналами датчика положення комутацію струмів в обмотках статора двигуна.

Принцип дії безконтактного двигуна розглянемо, аналізуючи принципову спрощену схему, представлену на рисунку 2.12.

У цю схему входить двигун з шихтованим з електротехнічної сталі статором, в пазах якого розташовуються три зсунуті в просторі на  $120^\circ$  обмотки статора А, В і С, з'єднання в зірку. Ротор двигуна виконаний у вигляді постійного магніту.

В одному корпусі з двигуном знаходиться датчик положення. Ротор датчика положення має вигляд сегмента, розташованого на одному валу з двигуном. Сегмент є сигнальним елементом СЕ датчика положення. На статорі датчика положення розміщуються чутливі елементи ЧЕ. Їх число дорівнює числу обмоток двигуна, а положення відповідає положенню відповідних обмоток. Як чутливі елементи можуть використовуватися датчики Холла, магнітодіоди і ін. Під впливом сигнального елемента (сектора) вони виробляють керуючі сигнали, що надходять в комутатор.

Комутатор в розглянутій схемі складається з трьох транзисторів ТА, ТВ, ТС, включених послідовно з обмотками А, В, С двигуна. Керуючі сигнали на транзистори поступають з відповідних чутливих елементів датчика положення. Транзистори працюють у ключовому режимі, т. е. Мають два стійких стану – «закритий» або «відкритий». Перше стан має місце при відсутності сигналу з чутливого елемента датчика положення, друге – при наявності цього сигналу. У положенні, показаному на рисунку 2.12, сигнальний елемент датчика положення знаходиться близько чутливого елемента, відповідного обмотці А статора. Це означає, що за рахунок керуючого сигналу (напруги) від цього елемента відкритий транзистор ТА і по обмотці А статора двигуна протікає струм  $I_A$ . Транзистори Тб і ТЗ закриті, і струму в обмотках В і С немає.

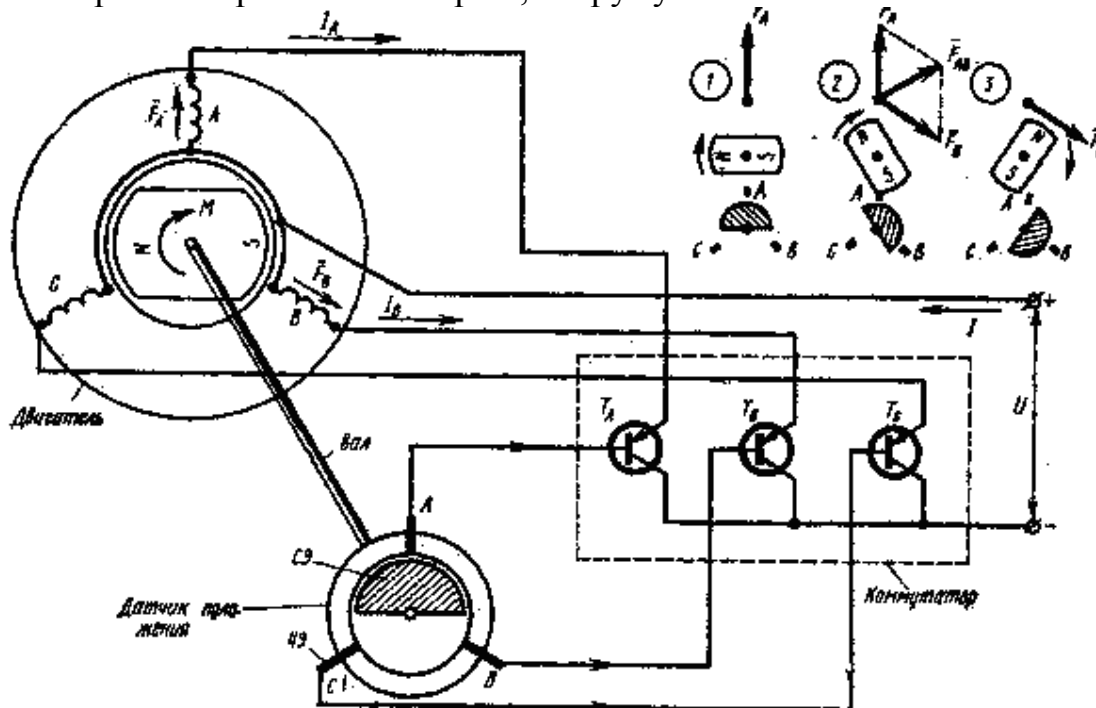


Рисунок 2.12 – Спрощена принципова схема вентильного двигуна з трьома обмотками на статорі



За рахунок взаємодії МДС  $F_A$  обмотки А статора з потоком полюсів постійного магніту ротора виникає крутний момент, який, впливаючи на ротор двигуна, повертає його за часовою стрілкою. Разом з ротором двигуна повертається і ротор датчика положення – його сигнальний елемент. При повороті ротора на кут, трохи більший  $30^\circ$ , сигнальний елемент буде впливати відразу на два чутливих елемента – елемент А і елемент В. Це означає, що одночасно будуть відкриті і транзистор ТА, і транзистор ТВ, а отже, будуть струми і в обмотці А, і в обмотці у двигуна. За рахунок МДС обмотки. В результаті МДС статора  $F_{AB}$  повернеться в порівнянні з початковим положенням на  $60^\circ$  (див. Положення 2 в правому верхньому куті рис. 2.12).

Під дією цієї МДС ротор двигуна буде продовжувати своє обертання за годинниковою стрілкою. Коли кут повороту буде трохи більше  $90^\circ$ , сигнальний елемент (сектор) буде впливати лише на чутливий елемент, відповідний обмотці В. Це означає, що транзистори ТА і МС будуть закриті. Струм буде тільки в обмотці В. МДС двигуна  $F_B$  дорівнюватиме МДС обмотки В (див. Положення 3 в правому верхньому куті рис. 2.12). Під дією цієї МДС ротор двигуна буде продовжувати своє обертання в колишньому напрямі. Обертаючись далі, сигнальний елемент буде впливати на чутливі елементи, відповідні обмоткам В і С і т.д. Таким чином здійснюється робота вентильного двигуна постійного струму.

При обертанні ротора потік постійного магніту наводить е. д. з. в обмотці якоря, яка разом з падінням напруги на опір обмотки врівноважує прикладена до двигуна напруження як і в звичайній машині постійного струму. Ротор двигуна розганяється до такої швидкості, при якій крутний момент, що розвивається двигуном, дорівнює моменту опору.

На рисунку 2.12 зображений двигун з трьома обмотками на статорі. Якщо збільшити число обмоток, а отже, і число чутливих елементів датчика положення, і число транзисторів комутатора до числа секцій (колекторних пластин), яке має звичайний двигун постійного струму, і вважати, що транзистори відкриваються і закриваються миттєво, то за своїми властивостями і характеристиками вентильний і звичайний двигуни постійного струму будуть абсолютно ідентичними.

Фізичні процеси в безконтактному двигуні будуть описувати тими ж рівняннями (2.1) ÷ (2.5), що і в контактному – колекторному двигуні постійного струму. Однак збільшення числа обмоток статора безконтактного двигуна пов'язано зі значними труднощами. Справа в тому, що реальні схеми безконтактних двигунів значно складніше спрощеної принципової схеми, представленої на рисунку 2.12, на якій зображені лише основні функціональні елементи.

В реальній схемі для забезпечення нормальної роботи датчика положення, посилення сигналів управління його чутливих елементів, забезпечення чіткої роботи транзисторів комутатора і т.п. Використовується велика кількість найрізноманітніших допоміжних елементів, які значно ускладнюють схему двигуна, збільшують її габарити і вартість. Саме тому при проектуванні безконтактних двигунів завжди прагнуть до мінімально

можливого числа обмоток статора, що призводить до зменшення числа чутливих елементів датчика положення і числа транзисторів комутатора. У сучасних вентильних двигунах число обмоток статора зазвичай не перевищує чотирьох.

Невелике число обмоток (секцій) обумовлює цілий ряд особливостей вентильного двигуна в порівнянні з колекторним двигуном.

На рисунку 2.13, а, представлені механічні характеристики вентильного двигуна при різних індуктивностях обмоток  $L$  і різних напрузі харчування - коефіцієнтах сигналу  $\alpha$ . Вони аналогічні характеристикам звичайного виконавчого двигуна постійного струму при якірному управлінні, тільки при  $L \neq 0$  вони нелінійні. Нелінійність характеристик збільшується зі збільшенням  $L$ . Вплив  $L$  особливо велике при виході з рухового режиму.

Швидкість обертання безконтактних двигунів можна регулювати в широких межах шляхом зміни напруги харчування і (коефіцієнта сигналу  $\alpha$ ). На практиці, однак, цей спосіб не отримав досить широкого застосування. Справа в тому, що в схему вентильного двигуна органічно входить комутатор, який по суті є підсилювачем потужності. Впливаючи на вхідні в комутатор транзистори, можна регулювати і стабілізувати швидкість обертання ротора вентильного двигуна з допомогою дуже незначних потужностей управління.

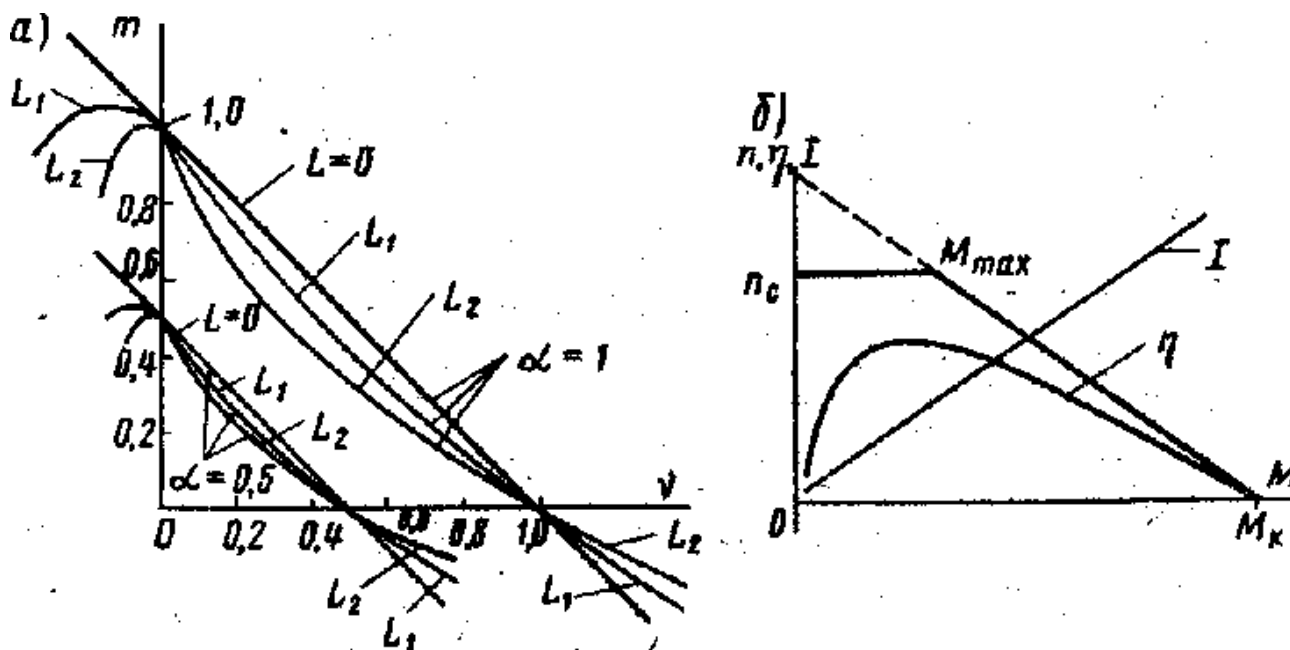


Рисунок 2.13 – Механічні (а) і робочі (б) характеристики вентильного двигуна постійного струму ( $L_2 > L_1$ )

На практиці найчастіше застосовуються частотно-імпульсні методи регулювання і стабілізації. На рисунку 2.13, б, представлені робочі характеристики вентильного двигуна зі стабілізацією швидкості при малих моментах опору.

Комутація струмів в вентильному двигуні, так само як і в контактному, багато в чому визначається індуктивністю  $L$  його обмоток. Для комутації струмів в напівпровідникових комутаторах застосовуються транзистори, добре працюють в двох режимах: «відкритий», «закритий». За своїми властивостями такі транзистори близькі до ідеальних ключів. Опір транзистора у закритому стані дуже велике, а в відкритому дуже мало (падіння напруження не перевищує десятих часток вольт). Час перемикання транзистора дуже мало:  $3 \div 30$  мкс.

Внаслідок малого часу перемикання при розмиканні обмотки якоря виникають великі перенапруги [ $E_L = di / dt$ ] на переході емітер-колектор, які можуть при значній індуктивності  $L$  привести до електричного пробою переходу.

Вельми серйозною проблемою при розмиканні обмотки з великою індуктивністю  $L$  є проблема розсіювання енергії магнітного поля ( $Li^2 / 2$ ), накопиченої обмоткою при протіканні по ній струму. Якщо не брати спеціальних заходів, ця енергія, виділяючись на переході емітер-колектор, може привести до перегріву транзистора і до виходу його з ладу. Для захисту транзисторів від перенапруг і перегріву застосовуються спеціальні схеми.

У деяких конструкціях вентильних двигунів енергія, накопичена відключається обмоткою за рахунок взаємоіндукції, передається іншій – включається обмотці. В цьому випадку вона йде на створення крутного моменту.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Брускин Д. Э. Электрические машины : ч. 1,2 / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – М. : Высшая школа, 1987.
2. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – СПб. : Энергия, 1974.
3. Кацман М. М. Электрические машины / М. М. Кацман. – М. : Высшая школа, 1990.
4. Коваль В. П. Електричні машини / В. П. Коваль. – Запоріжжя : – 2000.
5. Пиотровский Л. М. Электрические машины / Л. М. Пиотровский – СПб. : Энергия, 1975.
6. Петров Г. Н. Электрические машины. Ч. 1,2 / Г. Н. Петров. – М. – СПб. : Госэнергоиздат, 1963.
7. Сергеев П. С. Электрические машины / П. С. Сергеев – М. – СПб.. : Госэнергоиздат, 1962.
8. Токарев Б. Ф. Электрические машины / Б. Ф. Токарев. – М. : Энергоатомиздат, 1989.
9. Яцун М. А. Електричні машини / М. А. Яцун. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2001.

*Навчальне видання*

**ГЛЄБОВА** Марина Леонідівна,  
**ФОРКУН** Яна Борисівна

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЙ**  
з дисципліни

## **ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ**

### **ЧАСТИНА 3** **МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ** **ТА ВЕНТИЛЬНІ ДВИГУНИ**

*(для студентів усіх форм навчання за спеціальністю  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарової*

План 2017, поз. 160Л

---

Підп. до друку 11. 05. 2017  
Друк на ризографі  
Зам. №

Формат 60x84/16  
Ум. друк. арк. 2,4  
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002

Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017 р.